



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Comportamiento Hidromecánico de Agregados Cementados Artificialmente

Trabajo realizado por:

**Marcos José Polanco Candelario.**

Dirigido por:

**Antonio Lloret Morancho.**

**Enrique Edgar Romero Morales.**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica.**

Barcelona, 23 de septiembre de 2016

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

TRABAJO FINAL DE MÀSTER

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y  
PUERTOS DE BARCELONA  
ETSECCPB



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental**

## **COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE AGREGADOS CEMENTADOS ARTIFICIALMENTE.**

### **TRABAJO FINAL MÁSTER EN INGENIERÍA DEL TERRENO E INGENIERÍA SÍSMICA**

Presentado por:

Marcos José Polanco Candelario

Dirigido por:

Antonio Lloret Morancho.

Enrique Edgar Romero Morales

*"Elige un trabajo que ames, y no tendrás que volver  
a trabajar una vez en tu vida"*

*Confucio*

## AGRADECIMIENTOS

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.- ‘Filipenses 4:13’

Quiero agradecer a cada una de las personas que estuvieron directa o indirectamente para que esta etapa formativa se llegue a completar.

A mi familia que siempre estará conmigo no importa la distancia.

A los amigos que he dejado en mi país pero no olvidare nunca.

A las nuevas amistades que en esta nueva etapa he tenido el placer de conocer.

A mis tutores por tener paciencia conmigo y ser los mejores guías en este camino de formación profesional.

A todos simplemente,

Gracias

## RESUMEN

La investigación llevada a cabo parte de la continuación de la línea de investigación de la creación de clastos en el laboratorio con mezclas de cemento, con el suelo que se obtiene in situ en el Campus Nord, UPC. La fabricación de estos clastos conlleva un carácter principal, ya que permite disponer de un material artificial de características controlables. Esto es importante ya que permite estudiar experimentalmente y de forma sistemática materiales naturales análogos como los clastos carbonatados propios de la arcilla limosa de Barcelona. Debido a esta inquietud se realizan ensayos de laboratorio con mezclas de suelo natural y cemento, que formarán clastos con distintas características, de cara a investigar su comportamiento como material compactado.

Los ensayos realizados a estos clastos fabricados en el laboratorio se realizan de manera que se obtenga las propiedades hidromecánicas, volumétricas y gravimétricas haciendo comparativa con diferentes tipos de mezclas que lleven a analizar la diversidad de clastos.

Para llegar a la comparación de los clastos naturales obtenidos in situ con los fabricados artificialmente es necesario realizar estudios que impliquen la determinación de las resistencias de los clastos, tanto a compresión simple como a tracción indirecta. Finalmente, se han realizado ensayos edométricos con diferentes estados tensionales de carga-saturación-descarga.

Se han puesto los métodos de fabricación de las muestras, y la metodología de los diversos ensayos para estudiar el comportamiento mecánico de los materiales compuestos por agregados compactados con diferentes densidades y humedades.

Los resultados han permitido avanzar en el conocimiento del comportamiento hidromecánico de materiales compuestos por clastos de materiales cementados. Este estudio ha puesto de manifiesto la gran influencia de las condiciones de saturación en la deformación global del material y en la rotura de los agregados cementados.

## ABSTRACT

This research continues the investigation of clast creations with cement mixes in the laboratory, using a soil obtained in the Campus Nord, UPC. The manufacture of these clasts need close attention, as it uses a material with artificial controllable characteristics. This is important because it allows experimentally and systematically similar natural materials studies such as carbonated clasts, as the silty clay of Barcelona. Because of this concern, laboratory tests are performed with mixtures of natural soil and cement, which will form clasts with different characteristics in order to conduct investigations of its behavior as compacted material.

Tests made in the laboratory with these clasts are achieved so that the hydromechanical, volumetric and gravimetric properties are obtained, by comparing it with different types of mixtures that lead to analyzing the diversity of clast.

To get to the comparison of natural clasts obtained in situ using artificially manufactured clasts, studies are needed involving the determination of the resistance of these materials: both unconfined compressive and indirect tensile. Finally, edometric trials, using different stress states of saturation-load-discharge were made.

Manufacturing methods of the samples were established, as well as the methodology of the various tests to study the mechanical behavior of composite materials with different densities of compacted aggregate and humidities.

The results have made possible advances in the field of hydromechanical behavior of composite materials by clasts cemented materials. This study has revealed the influence of the saturation conditions present in the global deformation of material and breakage of cemented aggregates.

## ÍNDICE

1.	Introducción.....	13
1.1.	Antecedentes.....	13
1.2.	Objetivos.....	14
1.2.1.	Objetivos Generales.....	14
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	14
2.	Estudio de la composición y elaboración de las muestras ensayadas.....	15
2.1.	Componentes de las muestras.....	15
2.1.1.	Arcilla limosa del Campus Nord, Barcelona.....	15
2.1.2.	Cemento.....	17
2.2.	Dosificación de las muestras.....	18
2.3.	Realización de las muestras.....	23
2.3.1.	Equipamientos utilizados.....	23
2.3.2.	Proceso de fabricación.....	24
2.3.3.	Compactación de la muestras.....	25
3.	Ensayo de Compresión simple.....	26
3.1.	Descripción del ensayo.....	26
3.2.	Calculo del módulo de deformación.....	28
3.3.	Resultados obtenidos.....	29
4.	Ensayo de tensión indirecta.....	32
4.1.	Descripción del ensayo.....	36
4.2.	Metodología.....	37
4.3.	Resultados obtenidos.....	40
5.	Ensayo Edométrico con presión controlada.....	43
5.1.	Descripción del ensayo.....	44
5.2.	Metodología.....	48

5.3. Resultados obtenidos. ....	50
5.4. Análisis de los resultados.....	61
6. Conclusiones.....	63
7. Futuras líneas de investigación.....	64
8. Bibliografía.....	65



## LISTA DE FIGURAS E ILUSTRACIONES

<i>Figura 2.1-1 Curva granulométrica de los valores históricos del suelo arcilloso de Barcelona (González Blanco, 2012).</i>	16
<i>Figura 3.3-1 Grafico esfuerzo-deformación del conjunto de probetas con tiempo de curado de más de 30 días.</i>	30
<i>Figura 3.3-2 Grafico esfuerzo-deformación para las probetas con un tiempo de curado de 14 días.</i>	30
<i>Figura 3.3-3 Grafico esfuerzo-deformación de todas las probetas ensayadas.</i>	31
<i>Figura 3.3-4 Relación entre la resistencia a compresión simple y el contenido de humedad de las probetas ensayadas.</i>	32
<i>Figura 3.3-5 Relación entre la resistencia a compresión simple y el tiempo de fraguado de las probetas.</i>	32
<i>Figura 3.4-1 Grafico de los valores de la resistencias a compresión simple con relación al tiempo de curado de todas las mezclas diseñadas.</i>	34
<i>Figura 3.4-2 Relación entre la resistencia a compresión simple y la humedad inicial con la que parte la muestra tras realizar la mezcla completa.</i>	34
<i>Figura 3.4-3 Relación entre las resistencias y las humedades de la mezcla 21-6 conforme avanza el tiempo de curado.</i>	35
<i>Figura 3.4-4 Variación del módulo de deformación durante el tiempo de curado de las muestras.</i>	35
<i>Figura 4.3-1 Curva de resistencia a tracción con deformación diametral, en la que se obtiene el módulo resistente a tracción.</i>	41

## ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 2.1-1 Características del cemento Super Dragon EN 197-1- CEM I 52.5 R.</i>	17
<i>Ilustración 2.3-1 Conjuntos de elementos que conforma el molde utilizado para la fabricación de las probetas.</i>	23
<i>Ilustración 2.3-2 Prensa hidráulica de capacidad de 50 Tn utilizada para la compactación de las probetas.</i>	24
<i>Ilustración 2.3-3 Realización de la compactación estática a la muestra de suelo para obtener las probetas cilíndrica.</i>	25

<i>Ilustración 3.1-1 Prensa utilizada para los ensayos de compresión simples a las probetas fabricadas. ....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 4.2-1 Equipo utilizado para la implementación de tracción indirecta. ....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 4.2-2 Conjuntos de probetas en contacto con su generatriz para realizar ensayo de tracción indirecta.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 4.2-3 Modelo del ensayo de tracción indirecta en el que representa la cantidad de contacto en la que está sometida las probetas. ....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 4.2-4 Modelo del ensayo de tracción indirecta con más contacto entre las probetas. ....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 4.3-1 Rotura a tracción indirecta del modelo 1 para las diferentes mezclas diseñadas. ....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 4.3-2 Fotografía de las roturas producidas a las probetas del modelo 2 debido al ensayo de tracción indirecta. ....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 5.1-1 Fotografía del edómetro tipo Rowe utilizado para ensayar las probetas diseñadas. ....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 5.1-2 Componentes individuales del edómetro tipo Rowe utilizado. ....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 5.1-3 Detalles de diseño de la placa de carga y del vástago para drenaje y medida del desplazamiento vertical del edómetro (Cañavate Grimal, 2010). ....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 5.1-4 Modelo de la colocación de las probetas en el edómetro. ....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 5.1-5 Segunda capa de 7 probetas. ....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 5.1-6 Primera capa de 10 probetas. ....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 5.1-7 Tercera y última capa de 10 probetas ....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 5.3-1 Fotografía del ensayo 1900kPa_21-6_seco luego de haber terminado el estado de tensiones, representando las rotura en las probetas. ....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 5.3-2 Probeta fisurada debido al estado de carga-descarga del ensayo 1900kPa_21-6_seco. ....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 5.3-3 Fotos de las 2 probetas que han sufrido rotura debido al estado tensional del ensayo 1900kPa_21-6_seco. ....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 5.3-4 Fotografía del ensayo 1900kPa_21-6_sat luego de haber terminado el estado de tensiones, representando las rotura en las probetas.....</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 5.3-5 Estado de las probetas del ensayo 1900kPa_21-6_sat luego de haber terminado. ....</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 5.3-6 Tipos de roturas de las probetas en el ensayo 1900kPa_21-6_sat. ...</i>	<i>56</i>

<i>Ilustración 5.3-7 Estado de las probetas del ensayo 1000kPa_21-2_sat después de terminado.....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 5.3-8 Material obtenido del ensayo edométricos 1000kPa_21-2_sat.....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 5.3-9 Fotografía de los porcentajes retenidos en los tamices del ensayo granulométrico 1000kPa_21-2_sat. ....</i>	<i>60</i>

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2.1-1 Limites de Consistencia de la Arcilla Limosa de Barcelona (Romero Morales, 2013).</i>	15
<i>Tabla 2.1-2 Historial de la fracción granulométrica del suelo arcilloso de Barcelona. (González Blanco, 2012).</i>	16
<i>Tabla 2.2-1 Propiedades de los clastos tomados de base para los estudios de fabricación de muestras (Nonell Arellano, 2015).</i>	18
<i>Tabla 2.2-2 Valores iniciales e imagen de las muestras para obtener las dosificaciones de cada probeta.</i>	20
<i>Tabla 2.2-3 Tabla de resumen de los datos volumétricos y gravimétricos de la muestras.</i>	22
<i>Tabla 3.2-1 Valores iniciales de las probetas ensayadas.</i>	28
<i>Tabla 3.3-1 Valores de la humedad y resistencia a compresión simple de las probetas ensayadas dependiendo del tiempo de curado.</i>	29
<i>Tabla 3.3-2 Valores de los módulos elásticos de las probetas ensayadas a compresión uniaxial con relación al tiempo de fraguado</i>	31
<i>Tabla 3.4-1 Resistencias a compresión simple de cada una de las mezclas diseñadas en esta investigación y trabajos previos con relación al tiempo de fraguado.</i>	33
<i>Tabla 4.3-1 Resultados de las resistencias a tracción indirecta y módulos resistentes obtenidos.</i>	40
<i>Tabla 4.3-2 Esfuerzo a tracción indirecta máximo soportado por cada modelo.</i>	41
<i>Tabla 4.4-1 Comparación de los resultados de las resistencias a tracción indirecta y módulos resistentes obtenidos en los estudios previo y los analizados en esta investigación.</i>	43
<i>Tabla 5.3-1 Tabla de los valores medidos del ensayo 1900kPa_21-6_seco.</i>	50
<i>Tabla 5.3-2 Valores medidos antes y después de iniciar el ensayo 1900kPa_21-6_sat.</i>	53
<i>Tabla 5.3-3 Valores medidos antes y después de iniciar el ensayo 1000kPa_21-2_sat.</i>	56

## **1. Introducción.**

Con cada vez mayor frecuencia se hace necesario utilizar en obras de tierra los materiales que están en las cercanías de las obras. Ello implica la utilización de suelos que no obedecen a los criterios de admisión convencionales para los suelos compactados. Entre estos materiales no convencionales se encuentran los suelos con inclusiones de clastos carbonatados. Estos agregados carbonatados ayudan a aumentar la densidad seca del suelo compactado y a rebajar su humedad óptima pero presentan incertidumbres en su comportamiento debido a su escasa resistencia a la fractura.

El estudio experimental de estos materiales es difícil dada la variabilidad en el tamaño y resistencia de los agregados cementados naturales. Por ello es conveniente desarrollar una metodología de ensayo que utilice fragmentos cementados artificialmente de forma controlada. Para ello, en investigaciones anteriores llevadas a cabo en el Laboratorio de Geotecnia se ha utilizado cemento Portland.

El cemento, mezclado íntimamente con el suelo, proporciona a la mezcla la resistencia mecánica o la capacidad de soporte exigida y mejora tanto su durabilidad, entendiéndose por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como la estabilidad dimensional. (ANCADE, ANTER y IECA, 2010)

### **1.1. Antecedentes.**

Esta investigación tiene su origen en la continuación de la línea de investigación de la propuesta de tesis doctoral de Sajjad Mirsalehi, la cual tiene su enfoque en la experimentación con varios métodos de compactación “todo en uno” haciendo una comparación del suelo compactado con material grueso (S. Mirsaleji, 2014), así como también el trabajo final de master de Xavier Nonell con el tema “Fabricación de clastos artificiales en laboratorio y el estudio de sus propiedades hidromecánicas” (Nonell Arellano, 2015). Teniendo la finalidad de obtener agregados con características hidromecánicas fijadas, mediante la complementación de materiales como el suelo arcilloso del Campus Nord, Barcelona y cemento portland comercial.

Con la fabricación de las mezclas de suelo cemento empleadas en el laboratorio, se quiere obtener una relación de cómo se comportan la combinación de los materiales ya mencionados en relación con los fragmentos rocosos encontrados en in-situ. Debido a esta incertidumbre

se inicia la ejecución de esta investigación, la cual toma como punto de partida analizar los fragmentos artificiales creados en el laboratorio para así conocer sus propiedades y comportamientos hidromecánicos.

### **1.2. Objetivos.**

En esta investigación los objetivos se clasifican en dos niveles diferentes, en los que entran la parte general de toda la investigación y los que se refieren a una parte más detallada del análisis del estudio.

#### 1.2.1. Objetivos Generales.

- ✓ Establecer un procedimiento de fabricación de agregados que disponga de propiedades hidromecánicas prefijadas para la implementación en labores de investigación en laboratorio o, en su caso, en trabajos geotécnicos que necesiten de una mejora de terreno.
- ✓ Realizar una comparación de las propiedades hidromecánicas de los fragmentos fabricados artificialmente en relación a los fragmentos rocosos encontrados in-situ (Rockfill).

#### 1.2.2. Objetivos Específicos.

- ✓ Conocer el comportamiento mecánico del material compuesto por agregados compactados con diferentes densidades y humedades.
- ✓ Analizar el comportamiento a compresión simple de los agregados cementados artificialmente.
- ✓ Estudiar la conducta de los agregados fabricados en un estado de tracción indirecta.
- ✓ Conocer el comportamiento de rotura mediante ensayos edométricos con presión controlada de los agregados fabricados.
- ✓ Clasificar las propiedades hidromecánicas de los agregados cementados artificialmente.

## 2. Estudio de la composición y elaboración de las muestras ensayadas.

Las muestras fabricadas y ensayadas en esta investigación tiene el mismo criterio de elaboración y análisis que las muestras empleadas en la investigación “Fabricación de clastos artificiales en laboratorio y el estudio de sus propiedades hidromecánicas” (Nonell Arellano, 2015), pero enfocado a los objetivos generales y específicos de esta investigación.

A continuación se detalla cada uno de los componentes que se utilizaron para la elaboración de estas muestras, el proceso de fabricación así como las propiedades que estas muestras contienen.

### 2.1. Componentes de las muestras.

Para el desarrollo de la investigación se ha utilizado 3 componentes los cuales al unificar, dan como resultado una mezcla de suelo cemento hidratado.

- Arcilla limosa del Campus Nord, Barcelona
- Cemento
- Agua

#### 2.1.1. Arcilla limosa del Campus Nord, Barcelona.

Como elemento base, se ha elegido la arcilla limosa del Campus Nord, Barcelona. Esta consta de una mineralogía compuesta por fracciones de arcilla ilítica, así como unos límites de consistencia que se detalla en la tabla 2.1.1-1

*Tabla 2.1-1 Límites de Consistencia de la Arcilla Limosa de Barcelona (Romero Morales, 2013).*

Arcilla limosa de Barcelona		
Limite liquido ( $W_L$ )	32	%
Limite Plástico ( $W_P$ )	16	%
Densidad de Sólido ( $\rho_s$ )	2.66	Mg/m <sup>3</sup>
Superficie Específica ( $S_e$ )	12	m <sup>2</sup> /g

La obtención de este material se ha logrado debido a los suministros existentes en el laboratorio de geotecnia del departamento de ingeniería civil y ambiental, gracias a las obras en ejecución de un nuevo edificio en el Campus Nord de la UPC, se aprovechó para

extraer una buena cantidad de este suelo arcilloso. Para la elaboración de las muestras se utilizó todo aquel material fino que pasa por el tamiz #10 de 2mm. Se puede visualizar en la tabla 2.1.1-2 los diferentes estudios granulométricos hechos a este material durante el tiempo, dando así las curvas granulométricas históricas para el suelo estudiado (González Blanco, 2012), que se pueden visualizar en la figura 2.1.1-1.

Tabla 2.1-2 Historial de la fracción granulométrica del suelo arcilloso de Barcelona. (González Blanco, 2012).

Abertura (mm)	Material que pasa (%)				
	Surial et al (1998)	Sanderso n (2011)	Barrera (2002)	Buenfil (2007)	Gonzalez (2012)
<b>1.190</b>	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
<b>0.420</b>	92.203	89.223	83.459	85.129	84.000
<b>0.150</b>	82.261	58.786	68.031	71.707	67.900
<b>0.074</b>	74.046	52.994	60.373	65.720	58.300
<b>0.040</b>	63.019	44.166	50.599	51.016	40.300
<b>0.020</b>	48.037	34.169	37.984	36.731	28.800
<b>0.005</b>	32.052	22.863	22.863	23.085	17.800
<b>0.002</b>	24.004	16.876	16.124	18.546	13.200

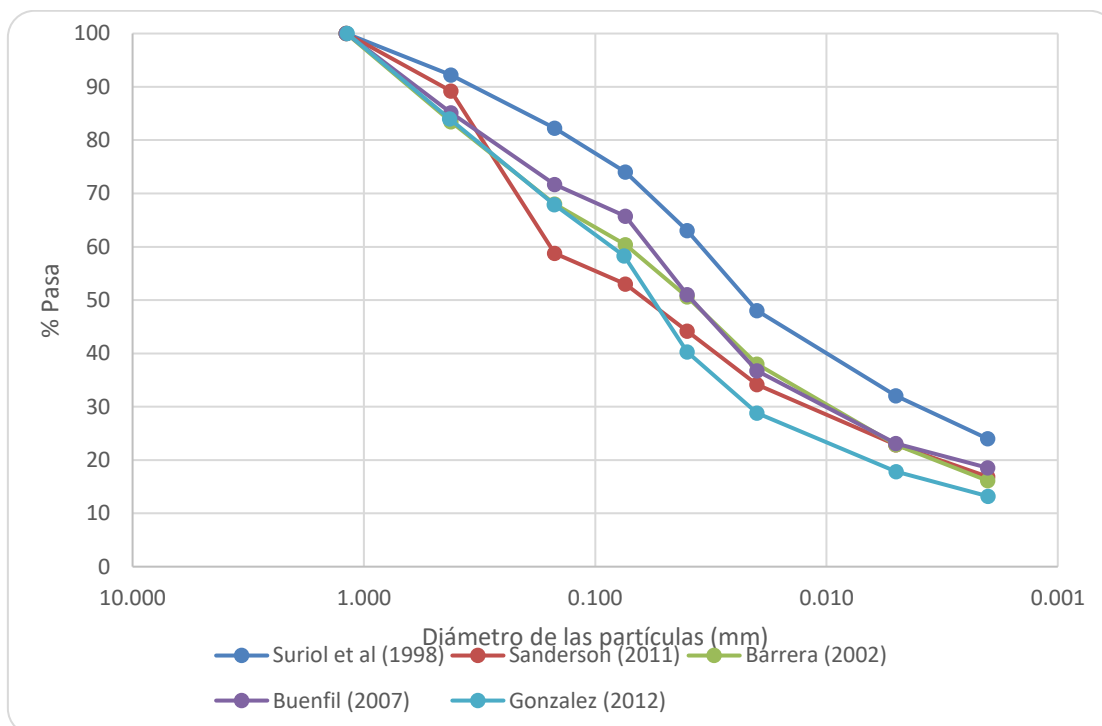


Figura 2.1-1 Curva granulométrica de los valores históricos del suelo arcilloso de Barcelona (González Blanco, 2012).



### 2.1.2. Cemento

Se ha utilizado cemento SUPER-DRAGON, fabricado por Cementos Molins Industrial, S.A. Es un cemento Portland tipo I de categoría resistente muy alta 52, 5 R. Ha estado diseñado especialmente para cubrir las necesidades de los sectores del hormigón preparado y de la industria de prefabricados de hormigón en las gamas de resistencias altas y muy altas ( Ciments Molins Industrial, 2016). En la ilustración 2.1.2-1 representa la ficha técnica del producto utilizado, en la que detalla sus características químicas, físicas y mecánicas.

	Valor habitual	Especificaciones según norma	
Clinker (%)	98	mín. 95 - máx. 100	
Componente minoritario (%)	2	mín. 0 - máx. 5	
Pérdida por calcinación (%)	2,5	máx. 5,0	(1)
Sulfato, SO <sub>3</sub> (%)	3,4	máx. 4,0	
Cloruros, Cl <sup>-</sup> (%)	0,04	máx. 0,10	
Residuo insoluble (%)	0,70	máx. 5,0	
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4600	-	(2)
Expansión Le Chatelier (mm) Inicio	0,5	máx. 10	
fraguado (min)	110	mín. 45	
Final fraguado (min)	170	máx. 720	
Compresión a 1 día (MPa)	27	-	(3)
Compresión a 2 días (MPa)	40	mín. 30,0	
Compresión a 7 días (MPa)	52	-	
Compresión a 28 días (MPa)	61	mín. 52,5	

(1) Químicas (2) Físicas (3) Mecánicas

AENOR certifica el cumplimiento de este cemento con las especificaciones de la norma UNE-EN 197-1 (cementos comunes), evaluándolo según lo establecido en el Reglamento Particular RP 15.01 (Marca N). Por lo tanto, dispone también del correspondiente certificado CE. Este cemento contiene un agente reductor del cromo (VI). AENOR certifica también, el cumplimiento del límite reglamentario del contenido en Cr (VI) soluble en agua según la norma UNE-EN 196-10.

Ilustración 2.1-1 Características del cemento Super Dragon EN 197-1- CEM I 52.5 R.

## 2.2. Dosificación de las muestras.

Para la realización de las muestras a ensayar, se planteó la elaboración de mezclas las cuales contengan un peso específico seco parecido a los clastos carbonatados encontrados in situ. Teniendo en cuenta lo complicado de llegar a estos valores lo que implica gran cantidad de energía de compactación.

En la tabla 2.2-1 describe las propiedades de los clastos usados para la comparación de los estudios de la compactación en relleno todo en uno de trabajos anteriores a esta investigación (Peralta Acosta, 2014) y que a la vez se tomaron en cuenta para realizar la fabricación de las muestras a ensayar en esta investigación.

Tabla 2.2-1 Propiedades de los clastos tomados de base para los estudios de fabricación de muestras (Nonell Arellano, 2015).

	Caliza	Pizarra Pancrudo (Lechago, Teurel)	Agregados Naturales Campus Nord
<b>Resistencia compresión simple, <math>q_u</math> (MPa)</b>	67 - 146	14 - 32	0.2
<b>Resistencia a tracción, <math>f_{ct}</math> (MPa)</b>	-	6 (satur) – 14 (seca)	-
<b>Sehudes (%)</b>	-	97 (5° Ciclo)	>10
<b>Densidad seca, <math>\rho_d</math> (Mg/m<sup>3</sup>)</b>	2.76	2.75	2.2
<b>Porosidad, <math>n</math> (%)</b>	1	6 - 12	19

Como se menciona anteriormente se toma el mismo criterio de fabricación que en el estudio de trabajo final de master de Xavier Nonell, “Fabricación de clastos artificiales en laboratorio y el estudio de sus propiedades hidromecánicas”, en el cual se parte de las siguientes condiciones:

- ✓ Se toma al cemento como un material seco y fino, que se sabe que va a reaccionar con el agua, pero se desconoce la velocidad y cómo afectará a la volumetría.
- ✓ Se tiene en cuenta que el agua de la muestra se dividirá entre la que va a la microestructura del suelo y la que reacciona con el cemento, y si sobra, se ubicará en poros aleatorios de la muestra en forma de agua capilar libre.

Las propiedades generales que se tienen en cuenta son:

- ✓ El peso específico de los sólidos del suelo tiene un valor entre 26.6 y 27 kN/m<sup>3</sup>.
- ✓ El peso específico de sólidos de cemento seco es de 31.5 kN/m<sup>3</sup>. El peso específico del agua es de 10 kN/m<sup>3</sup>.
- ✓ La humedad de saturación que puede albergar la microestructura del suelo es de un 7.4 % aproximadamente ( $\omega_{\text{micro}}$ ).
- ✓ La ratio mínima de masas entre el cemento y el agua con la que reacciona (a/c) es de 0.38 para que se produzca la hidratación de todo el cemento.

Tomando en cuenta todas estas características, se decide fabricar 2 tipos de muestras, todas con un peso específico de 21 kN/m<sup>3</sup>. La diferencia se establece en el contenido porcentual de masa de cemento seco con respecto a la masa de suelo seco ( $M_c/M_s$ ). En las primeras muestras se toma un porcentaje de 2%, siendo esta una de las volumetrías tomando en cuenta en los trabajos de investigación previos. Y la última muestra consta de una cantidad de cemento mayor, dando un porcentaje de 6% de masa de cemento seco entre masa de suelo seco.

Las notaciones que en adelante se refieren a estas 2 muestras son las siguientes:


1. 21-2
2. 21-6

Haciendo referencia al peso específico que lo caracteriza y el porcentaje de masa de cemento respecto a la masa de suelo seco ( $M_c/M_s$ ).

Ya con estos valores de partida se puede dar paso a obtener el peso de suelo ( $M_s$ ), el peso de cemento seco ( $M_c$ ) y el peso de agua ( $M_w$ ) que se utilizaran para cada una de las muestras a ensayar.

En la tabla 2.2-2 detalla los parámetros iniciales de las muestras al momento de ser fabricadas y que nos sirven para obtener los valores de las dosificaciones de estas.

Tabla 2.2-2 Valores iniciales e imagen de las muestras para obtener las dosificaciones de cada probeta.

	Datos Iniciales	Valor	Unidades
	Altura (h)	7.6	cm
	Diámetro ( $\phi$ )	3.8	cm
	Área (A)	11.34	cm <sup>2</sup>
	Volumen (V <sub>t</sub> )	86.19	cm <sup>3</sup>
	Densidad de sólidos del suelo ( $\rho_s$ )	2.66	g/cm <sup>3</sup>
	Densidad del cemento seco ( $\rho_c$ )	3.15	g/cm <sup>3</sup>
	Densidad seca ( $\rho_d$ )	2.1	g/cm <sup>3</sup>
	Densidad del agua ( $\rho_w$ )	1	g/cm <sup>3</sup>
	Humedad natural del suelo ( $\omega$ )	3	%
	Humedad de la microestructura ( $\omega_{micro}$ )	7.4	%
	Ratio de la masa de cemento y agua que reacción con el cemento (a/c)	0.38	-
	Porcentaje de cantidad de cemento con relación al suelo (c/s)	2 y 6	%

Para obtener los valores de las masas correspondientes a la cantidad de suelo y cemento que en conjunto conforman la parte sólida se utilizó la siguiente fórmula:

$$\bullet M_{s+c} = \rho_d * V_t \quad \text{Ecuación 2.2-1}$$

Teniendo la masa total de sólidos utilizados para la elaboración de la muestra, se procede a obtener cada valor individual tanto para la masa de suelo seco (M<sub>s</sub>) como para la masa de cemento seco (M<sub>c</sub>), que con ayuda de las siguientes fórmulas se obtuvieron:

$$\bullet M_s = \frac{M_{s+c}}{1+\frac{c}{s}} \quad \text{Ecuación 2.2-2}$$

$$\bullet M_c = \frac{c}{s} * M_s \quad \text{Ecuación 2.2-3}$$

Para obtener la cantidad de agua que se le añadirá a cada una de las muestras (21-2 y 21-6), se parte del hecho que el grado saturación servirá como parámetro de diseño para cada una de las probetas siendo los siguientes:

- 21-2 con un  $S_r = 0.80$
- 21-6 con un  $S_r = 0.90$

Utilizando la ecuación de la humedad total de las muestras (Ecuación 2.2-4) que se detalla a continuación se puede obtener lo que es la masa de agua total, la cual se conforma por masa de agua perteneciente a la microestructura del suelo ( $Mw_s$ ) (Ecuación 2.2-5), masa de agua que reacciona con el cemento ( $Mw_c$ ) (Ecuación 2.2-6) y masa de agua total ( $Mw_t$ ) (Ecuación 2.2-7):

$$\bullet \quad \frac{Mw_t}{M_{s+c}} = \frac{\left\{ Sr * \left[ \left( \frac{1 + \frac{c}{s}}{\rho_d} \right) - \left( \frac{c}{s} * \rho_d \right) - \left( \frac{1}{\rho_s} \right) \right] * \rho_w \right\}}{1 + \frac{c}{s}} \quad \text{Ecuación 2.2-4}$$

$$\bullet \quad Mw_s = \omega_{micro} * M_s \quad \text{Ecuación 2.2-5}$$

$$\bullet \quad Mw_c = \frac{a}{c} * M_c \quad \text{Ecuación 2.2-6}$$

$$\bullet \quad Mw_t = Mw_s + Mw_c + Mw_l \quad \text{Ecuación 2.2-7}$$

Gracias a todas estas ecuaciones se alcanza los volúmenes necesarios para la fabricación de las probetas. En la tabla 2.2-3 resumen todos los parámetros relativos a la volumetría y gravimetría de las muestras a elaborar.

Tabla 2.2-3 Tabla de resumen de los datos volumétricos y gravimétricos de la muestras.

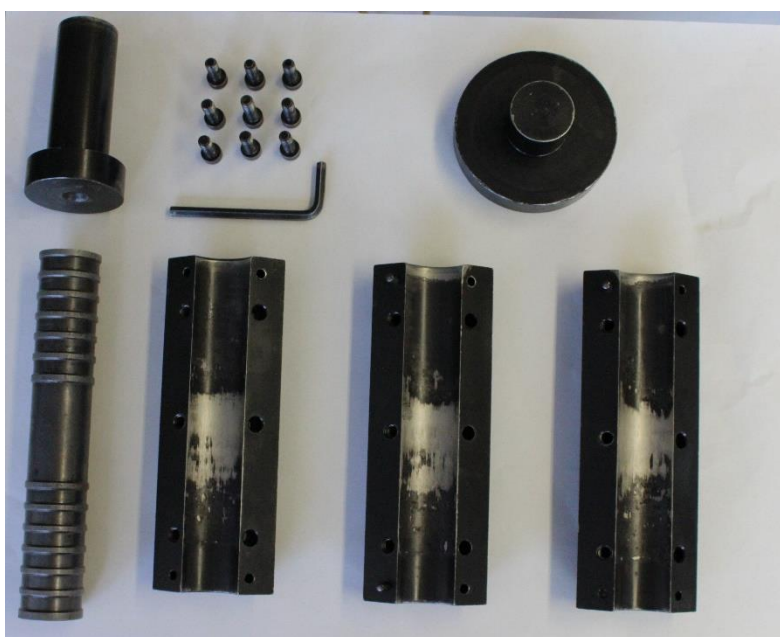
Diseño		
Muestras	21-2	21-6
Masa suelo seco, $W_s$ (g)	179.79	173.01
Masa cemento seco, $W_c$ (g)	3.60	10.38
Masa agua $W_w$ (g)	15.08	17.31
Masa total (g)	198.27	200.70
Densidad del Suelo, $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.67	2.67
Desnsidad del cemento, $\rho_c$ (Mg/m <sup>3</sup> )	3.15	3.15
Densidad del agua, $\rho_w$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.00	1.00
Volumen de suelo, $V_s$ (cm <sup>3</sup> )	67.34	64.80
Volumen de cemento, $V_c$ (cm <sup>3</sup> )	1.14	3.30
Volumen de agua, $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	15.08	17.31
Volumen total, $V_{total}$ (cm <sup>3</sup> )	87.33	87.33
Relación cemento-suelo, $c/s$ (%)	0.02	0.06
Densidad específica, $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.10	2.10
Masa de suelo seco, $W_s$ (g)	179.79	173.01
Masa de cemento seco, $W_c$ (g)	3.60	10.38
Masa de agua al suelo $W_{\omega_s}$ (g)	13.30	12.80
Masa de agua al cemento, $W_{\omega_c}$ (g)	1.37	3.94
Masa de agua libre, $W_{\omega_l}$ (g)	0.41	0.56
Masa de agua total, $W_{\omega_t}$ (g)	15.08	17.31
$V_s$ (cm <sup>3</sup> )	67.34	64.80
$V_c$ (cm <sup>3</sup> )	1.14	3.30
$V_{\omega_s}$ (cm <sup>3</sup> )	13.30	12.80
$V_{\omega_c}$ (cm <sup>3</sup> )	1.37	3.94
$V_{\omega_l}$ (cm <sup>3</sup> )	0.41	0.56
$V_{\omega_t}$ (cm <sup>3</sup> )	15.08	17.31
Volumen de aire $V_a$ (cm <sup>3</sup> )	3.77	1.92
Volumen de poros $V_h$ (cm <sup>3</sup> )	18.85	19.24
Porosidad, $n$	0.22	0.22
Índice de poros, $e$	0.28	0.28
Grado de saturación, $S_r$ (-)	0.80	0.90

### 2.3. Realización de las muestras.

Todas las probetas han sido fabricadas en el laboratorio de geotecnia del departamento de ingeniería civil y ambiental. Las muestras se realizan con el objetivo de obtener probetas las cuales simulen clastos naturales, para esto se utilizan varios elementos que ayudan a que las muestras tomen la forma y contextura que se requiere.

#### 2.3.1. Equipamientos utilizados.

Para la elaboración de las probetas se utilizaron los utensilios que se disponen en el laboratorio de geotecnia del departamento de ingeniería civil y ambiental, como son las bandejas, martillo de goma, espátulas, balanzas digitales, entre otros elementos que son de apoyo para el proceso de elaboración de las muestras. Para este estudio nos enfocamos, en primer lugar, en utilizar el molde rígido cilíndrico para fabricar probetas con características de 77mm de altura y 38mm de diámetro, como se visualiza en la ilustración 2.3.1-1.



*Ilustración 2.3-1 Conjuntos de elementos que conforma el molde utilizado para la fabricación de las probetas.*

Ya teniendo lo que es el molde para darle forma a las muestras, se procede a utilizar las prensas para la compactación estática de las muestras, al ser muestras de gran densidad, se utilizó la prensa con mayor capacidad de carga a fin de lograr mantener la densidad en las probetas. La ilustración 2.3.1-2 muestra la prensa utilizada, prensa hidráulica de una capacidad de carga de 50 Ton de capacidad.



*Ilustración 2.3-2 Prensa hidráulica de capacidad de 50 Tn utilizada para la compactación de las probetas.*

### 2.3.2. Proceso de fabricación.

Ya teniendo los cálculos y fórmulas necesarias para fabricar las muestras, el próximo paso consiste en alcanzar el peso de cada uno de los elementos por separado las cantidades de los elementos individuales que conforma la muestra (suelo, agua y cemento), dependiendo el tipo de muestra que se vaya a elaborar.

Ya teniendo las cantidades exactas se procede a mezclar todos los elementos, tomando en cuenta que primero se mezcla el suelo del Campus Nord con el cemento de manera homogénea y para terminar se le agrega la cantidad de agua calculada, de manera que todos los elementos se incorporen de manera tal que no haya presencia de grumos en la mezcla.

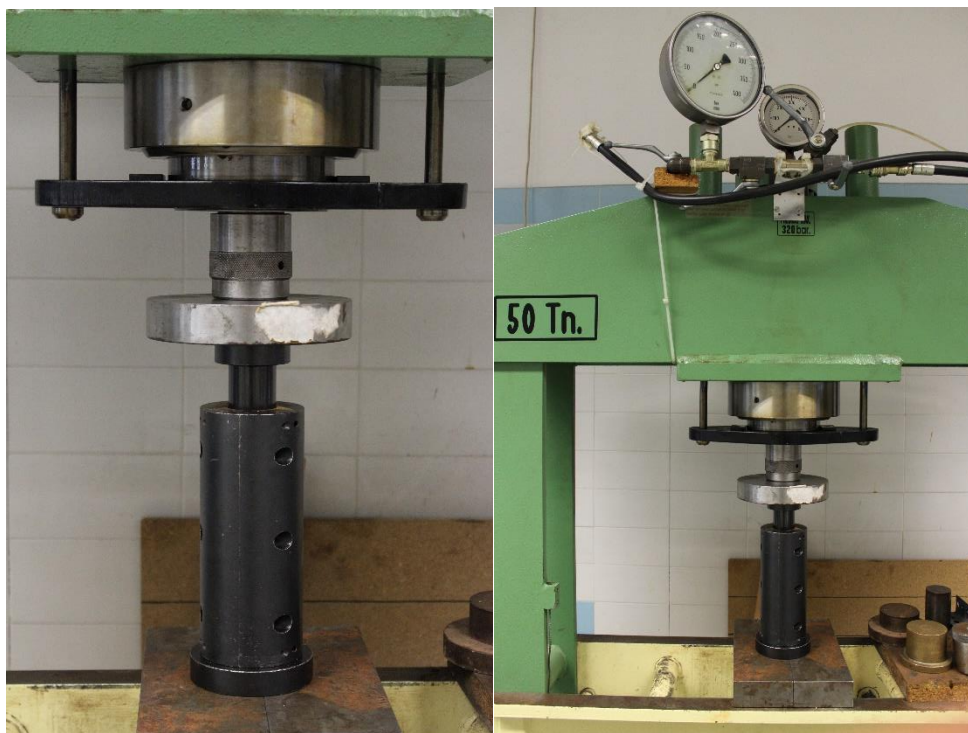
Luego de tener todos los elementos unificados, se ejecuta lo que es el llenado del molde, teniendo mucho cuidado de no perder ninguna cantidad de la mezcla realizada, para después realizar la compactación de la muestra utilizando la prensa anteriormente mencionada. Es importante tomar en cuenta que el molde está debidamente engrasado para evitar que el material se adhiera a las paredes del molde y sea de fácil extracción.



### 2.3.3. Compactación de la muestras.

La compactación de las muestras consiste en aplicarle una energía al suelo suelto, ejerciendo una fuerza tal que logre densificar la muestra y a la vez se tenga como resultado una probeta con mayor resistencia y menor permeabilidad. La compactación representa la modificación de la estructura inicial cambiando la distribución de agregados, grumos y los poros entre ellos. Hay que tener en cuenta que el objetivo de realizar la compactación estática en estas muestras de suelo-cemento, es obtener el valor fijo de la densidad, que como ya se ha descrito anteriormente se tiene fijada para un valor de  $21 \text{ kN/m}^3$ .

En la ilustración 2.3.3-1 se observa la maquinaria ya descrita anteriormente en la que se ejerce la compactación estática en el molde con la mezcla de los elementos que conforma las probetas.



*Ilustración 2.3-3 Realización de la compactación estática a la muestra de suelo para obtener las probetas cilíndrica..*

Ya para finalizar se extrae la probetas del molde se toman todos los datos iniciales, pesado y medidas geométricas. Para curar las muestras se procede inmediatamente luego de sacarlas del molde cubrirlas con papel plástico para que no haya pérdidas de humedad, criterio difícil de controlar.

### **3. Ensayo de Compresión simple.**

El ensayo a compresión simple o compresión uniaxial consiste en aplicar una carga axial sin confinamiento lateral y teniendo un control de las deformaciones ocurridas por esa aplicación de carga, a fin de obtener la resistencia o esfuerzo ultimo de un suelo cohesivo. Una vez ya elaboradas todas las probetas con sus respectivas dosificaciones, compactadas y con sus tiempos de curado se inician los ensayos para verificar que resistencias han de obtener estos clastos ya fabricados.

#### **3.1. Descripción del ensayo.**

Los ensayos de compresión simple son el punto de partida para iniciar la determinación de las características de los clastos que se han fabricado en esta investigación. Se ha tomado como variable el tiempo de curado de las probetas, para así hacer un comparativo de cómo afecta el tiempo de curado en la obtención de la resistencia de cada una de las muestras de esta investigación.

Para el estudio de esta investigación solo se efectuó ensayos de compresión simple a las muestras de notación de 21-6, debido a que estas son muestras que no se han hecho estudio alguno, a diferencia de las muestras de 21-2 que se han ensayado en el trabajo final de master de Xavier Nonell y se tomarán también los valores que se ha obtenido en esos ensayos para comprarlos con los que se han hecho en esta investigación.

Se ha tomado 8 probetas de 21-6, las cuales se han dividido en 4 probetas con tiempo de curado mayor de 1 mes y 4 probetas con tiempo de curado de 2 semanas.

Para realizar los ensayos de compresión uniaxial se ha utilizado otra de las prensas que están disponibles en el laboratorio de geotecnia del departamento de ingeniería civil y ambiental, en la ilustración 3.1-1 se muestra la prensa de modelo Wykeham Farrance con una capacidad de carga de 5000kg.



*Ilustración 3.1-1 Prensa utilizada para los ensayos de compresión simples a las probetas fabricadas.*

El procedimiento de ensayado consiste en colocar la muestra entre 2 placas de metal para que haya una repartición uniforme de la fuerza de compresión que se va aplicando a la probeta. La velocidad de avance de la carga en la probeta se ha fijado en 0.5 mm/minuto. En todo momento se ha utilizado aparatos LVDT para medir las deformaciones verticales que van sufriendo las muestras mientras se le van aplicando las cargas, lo que ha ayudado a calcular el módulo de deformación de cada probeta que se caracteriza.

Ya luego de lograr romper las probetas ensayadas se recoge todos los datos arrojados por el ensayo y se toma en fragmentos de cada muestras para llevarlos al horno y obtener su humedad.

### 3.2. Cálculo de los parámetros del ensayo.

Después de haber realizado la compresión simple a cada una de las probetas seleccionadas, se obtienen los datos medidos que iban arrojando mientras se realizaba el ensayo. En la tabla 3.2-1 se enumeran los datos iniciales de las probetas de la mezcla 21-6. Todas las probetas que se utilizaron constan de estos parámetros iniciales. Respecto al tiempo de curado, como se ha mencionado anteriormente se ha dividido en 2 grupos.

Tabla 3.2-1 Valores iniciales de las probetas ensayadas.

Muestras 21-6	
Área (cm <sup>2</sup> )	11.5 cm <sup>2</sup>
Peso del suelo seco, W <sub>s</sub>	178.2 g
Peso del cemento seco, W <sub>c</sub>	10.38 g
Peso del agua, W <sub>w</sub>	11.9g
Humedad inicial, ω <sub>i</sub>	8.11 %
Relación suelo-cemento, a/c	6 %

Teniendo los valores de la célula de carga y los valores obtenidos por el LVDT de los desplazamientos verticales se procede a definir los conceptos de esfuerzo-deformación en cada una de las probetas ensayadas. La tensión vertical se mide como el cociente entre la fuerza  $F$ , aplicada en la prensa y el área  $A$ , de la probeta, es decir:

$$\bullet \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 3.2-1}$$

El área  $A$  se ha considerado constante, dada la elevada rigidez de las muestras. Teniendo los valores de la resistencia a compresión simple de cada probeta, se calcula la humedad que estas probetas contienen al momento de ser ensayadas.

Partiendo de los valores obtenidos en el gráfico de esfuerzo-deformación se obtienen los valores del módulo elástico de cada una de las probetas, lo cual nos da una idea de la rigidez de las probetas. Este coeficiente elástico puede ser calculado mediante la siguiente diferencia:

$$\bullet \quad E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad \text{Ecuación 3.2-2}$$

### 3.3. Resultados obtenidos.

El objetivo de realizar la compresión simple en probetas con diferentes tiempos de curado para una misma mezcla (21-6) es saber cómo se comporta la resistencia de las probetas durante paso del tiempo. En la tabla 3.3-1 se tiene los valores de las humedades de las probetas ensayadas, considerando 3 probetas de cada intervalo de tiempo de curación de las probetas.

Se observa que conforme ha pasado el tiempo la humedad de las muestras ha ido decayendo, haciendo que las probetas sean más secas. Este comportamiento se debe a la mala conservación de las probetas luego de ser fabricadas, las cuales con el tiempo van perdiendo la cantidad de agua que no reacciona con el cemento y se encuentra en un estado libre.

Debido a la pérdida de humedad las resistencias de las probetas se vieron afectadas ya que como se puede visualizar en la tabla 3.3-1, que muestra los valores de la resistencia a compresión simple ( $q_u$ ), las probetas con más tiempo de curación tiene una resistencia menor en relación con las muestras con un tiempo menor.

**Tabla 3.3-1** Valores de la humedad y resistencia a compresión simple de las probetas ensayadas dependiendo del tiempo de curado.

Tiempo de curado: 1 mes				Tiempo de curado: 2 semanas			
Probeta 2				Probeta 6			
$\omega$ (%)	5.3	$q_u$ (MPa)	8.4	$\omega$ (%)	7.5	$q_u$ (MPa)	12.0
Probeta 3				Probeta 7			
$\omega$ (%)	5.7	$q_u$ (MPa)	8.8	$\omega$ (%)	7.3	$q_u$ (MPa)	12.2
Probeta 4				Probeta 8			
$\omega$ (%)	5.9	$q_u$ (MPa)	8.9	$\omega$ (%)	7.2	$q_u$ (MPa)	10.5

Las figuras 3.3-1 y 3.3-2 grafican los valores de la tensiones aplicadas y las deformaciones que sufrieron mientras se aplica el esfuerzo. En la figura 3.3-1 se presentan los valores de las muestras ensayadas luego de tener un tiempo de curado de 30 días, en la figura 3.3-2 se detallan los de las probetas con un tiempo de curado de, 14 días para ser

exactos y la figura 3.3-3 representa de manera comparativa todas las curvas de esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas, en donde claramente se visualiza la condición de diferencia de resistencias entre las dos series de probetas.

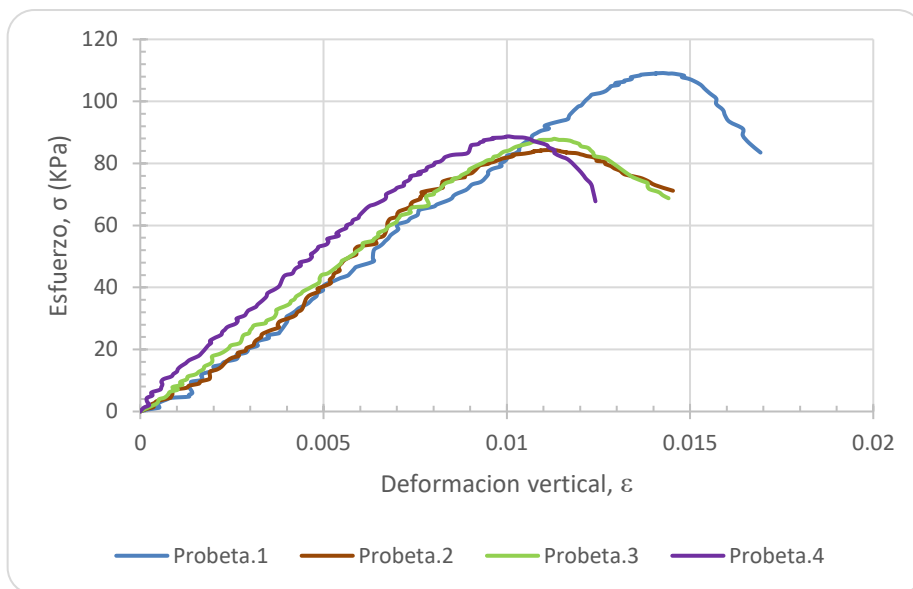


Figura 3.3-1 Gráfico esfuerzo-deformación del conjunto de probetas con tiempo de curado de más de 30 días.

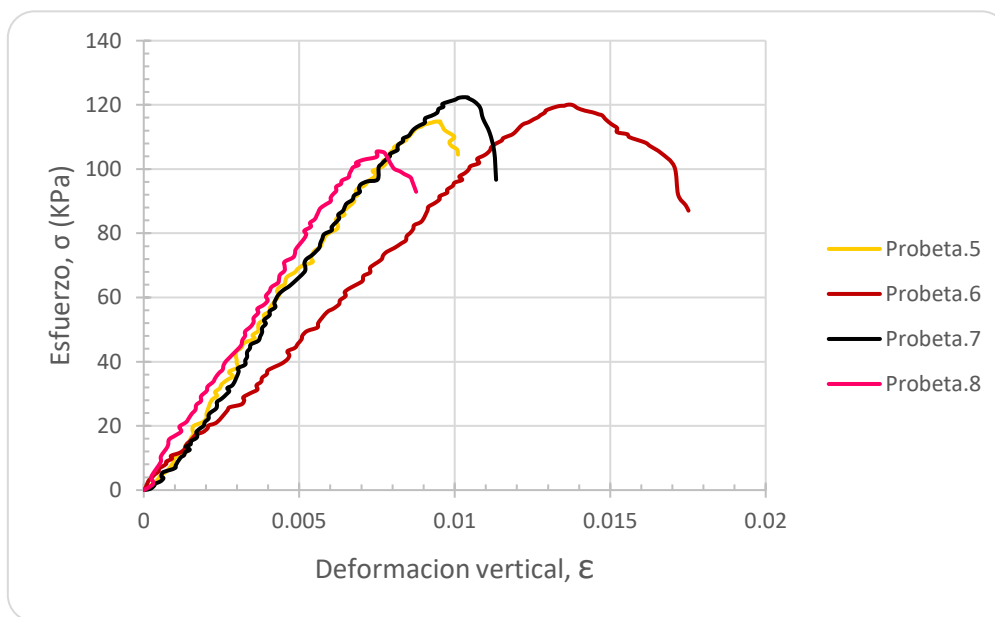


Figura 3.3-2 Gráfico esfuerzo-deformación para las probetas con un tiempo de curado de 14 días.

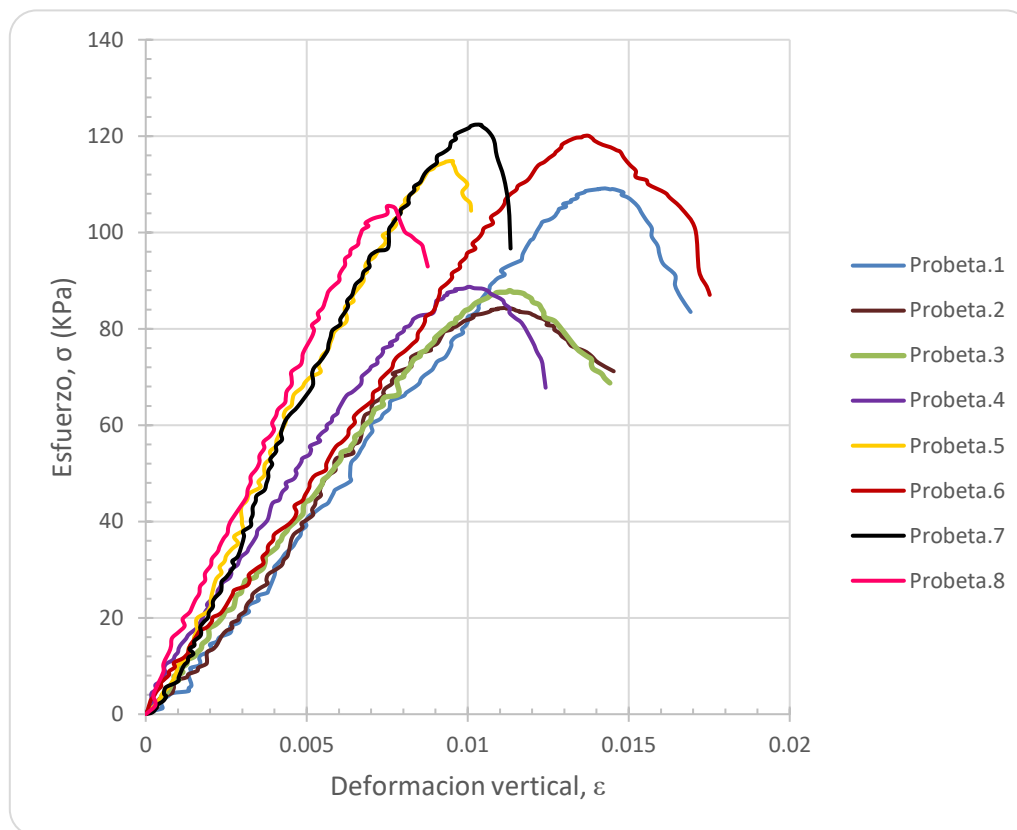


Figura 3.3-3 Gráfico esfuerzo-deformación de todas las probetas ensayadas.

En la tabla 3.3-2 presenta los valores del módulo elástico de cada una de las probetas y los días de curadas en que estas han sido sometidas.

Como es importante destacar el efecto de la pérdida de humedad en las muestras, la figura 3.3-4 representa los valores de las resistencias a compresión uniaxial con relación al contenido de humedad en las probetas

Tabla 3.3-2 Valores de los módulos elásticos de las probetas ensayadas a compresión uniaxial con relación al tiempo de fraguado

30 días de curado	14 días de curado
Probeta 1	Probeta 5
E (kPa)= 8559.7	E (kPa)= 13793
Probeta 2	Probeta 6
E (kPa)= 9437.1	E (kPa)= 9456.7
Probeta 3	Probeta 7
E (kPa)= 8748.7	E (kPa)= 14179
Probeta 4	E Probeta 8
E (kPa)= 9912.2	E (kPa)= 15066



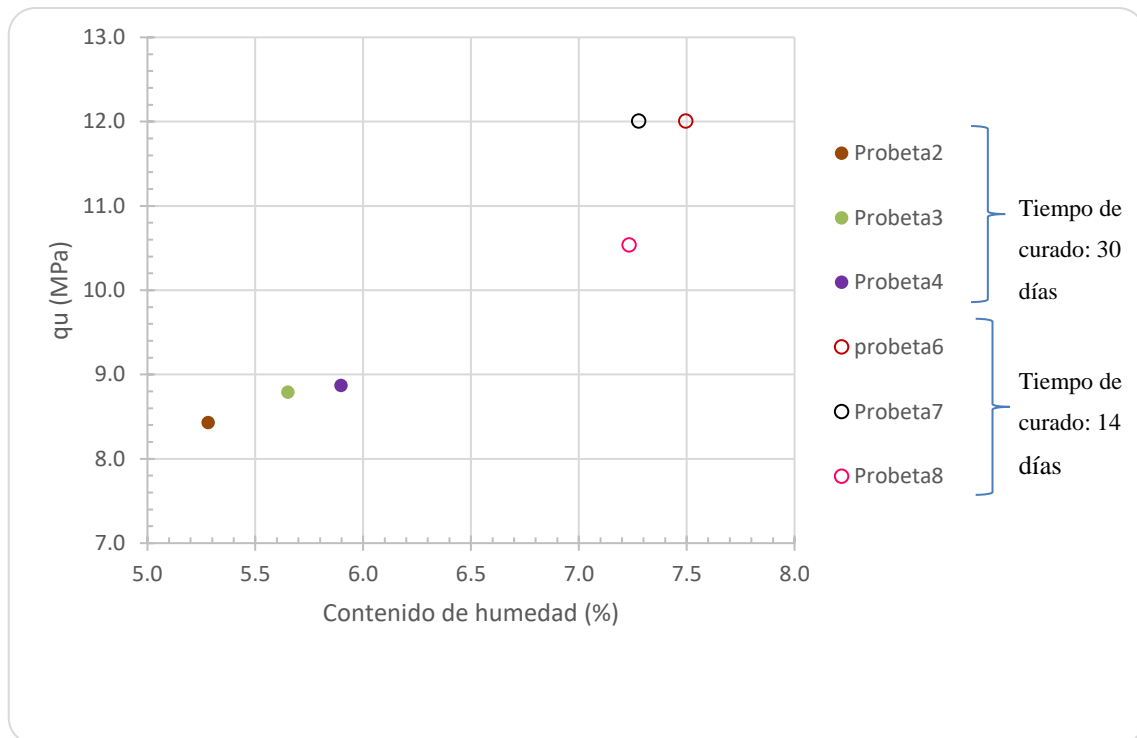


Figura 3.3-4 Relación entre la resistencia a compresión simple y el contenido de humedad de las probetas ensayadas.

El comportamiento de las probetas en relación a la resistencia a compresión simple, se ve afectando por el contenido de humedad que las probetas tengan al momento de ser ensayadas, mientras más secas son las probetas, menos resistentes son durante el tiempo, como se observa en la figura 3.3-5.

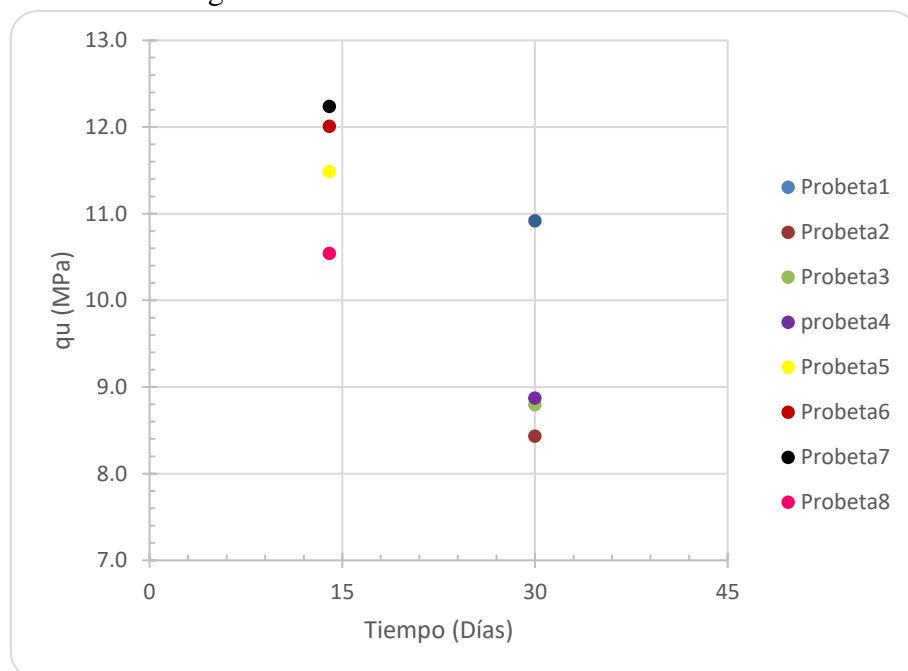


Figura 3.3-5 Relación entre la resistencia a compresión simple y el tiempo de fraguado de las probetas.



### 3.4. Análisis de los resultados.

Es importante realizar una comparación de los parámetros obtenidos en este ensayo con todas las muestras estudiadas en los trabajos previos y las muestras fabricadas en esta investigación con el objetivo de analizar el comportamiento de las probetas con diferentes densidades y humedades sometidas a un estado de tensión uniaxial.

Para empezar en la tabla 3.4-1 contiene los valores de cada una de las resistencias a compresión simple de las diferentes mezclas con las que se fabricaron las probetas que se han ensayado tanto en los estudios previos como en esta investigación, teniendo como comparación los días de fraguados en las que fueron sometidas (Nonell Arellano, 2015).

*Tabla 3.4-1 Resistencias a compresión simple de cada una de las mezclas diseñadas en esta investigación y trabajos previos con relación al tiempo de fraguado.*

Mezclas	$q_u$	
	14 Días	30 Días
<b>17-8</b>	2.63 MPa	3.2 MPa
<b>17-25</b>	5.84 MPa	7.12 MPa
<b>17-80</b>	14.23 MPa	18.84 MPa
<b>21-2</b>	6.75 MPa	8.73 MPa
<b>21-4</b>	10.21 MPa	11.9 MPa
<b>21-6</b>	11.57 MPa	9.25 MPa

Analizando la tabla anterior y teniendo como referencia las resistencias de los trabajos previos (Nonell Arellano, 2015), se puede notar que las resistencias de esas mezclas van aumentando con el tiempo y en el caso de la mezcla realizada en esta investigación los parámetros de resistencia han disminuido conforme ha aumentado el tiempo de fraguado, como muestra la figura 3.4-1 la cual da una visión más clara de este comportamiento.

El cambio de resistencia de las probetas de mezclas 21-6 conforme va avanzado el tiempo de curación de las mismas tiene un comportamiento poco significativo en relación con las otras mezclas de los trabajos previos, ya que se le atribuye a que las muestras han perdido humedad al momento de curación. Esto se puede observar en la figura 3.4-2, que relaciona las resistencias de las mezclas con la cantidad de humedad inicial

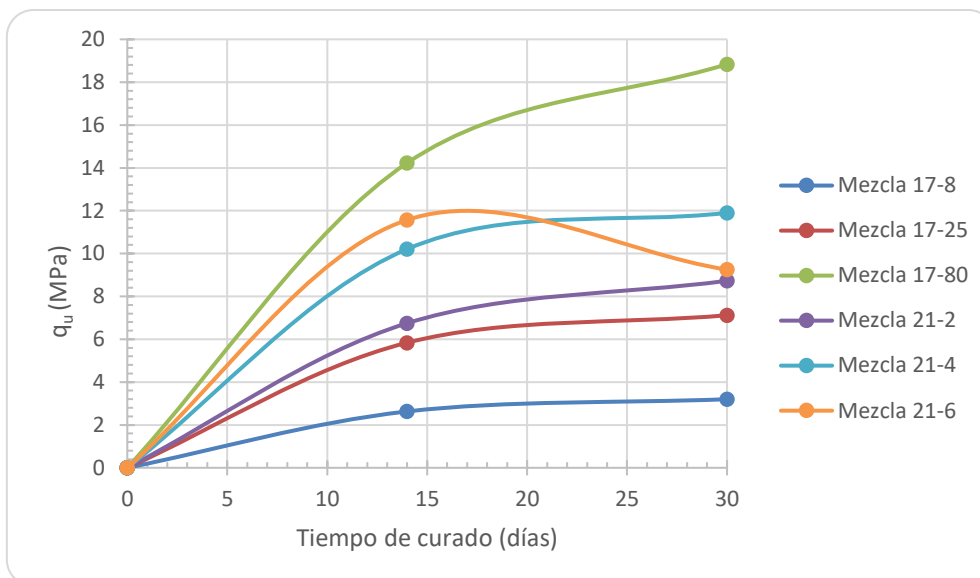


Figura 3.4-1 Gráfico de los valores de la resistencias a compresión simple con relación al tiempo de curado de todas las mezclas diseñadas.

En la figura 3.4-2 se observa que, a menor humedad, se obtiene menor resistencia a compresión simple. Lo que favorece la hipótesis planteada anteriormente sobre la perdida de humedad en la muestras. La figura 3.4-3 muestra las resistencias a compresión simple de la mezcla 21-6 con relación a las humedades que contiene las probetas acorde al tiempo de curado.

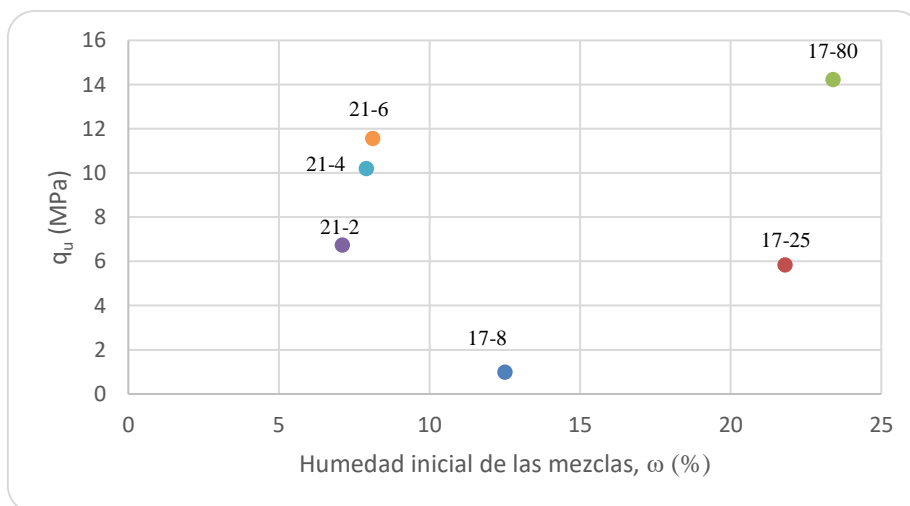


Figura 3.4-2 Relación entre la resistencia a compresión simple y la humedad inicial con la que parte la muestra tras realizar la mezcla completa.

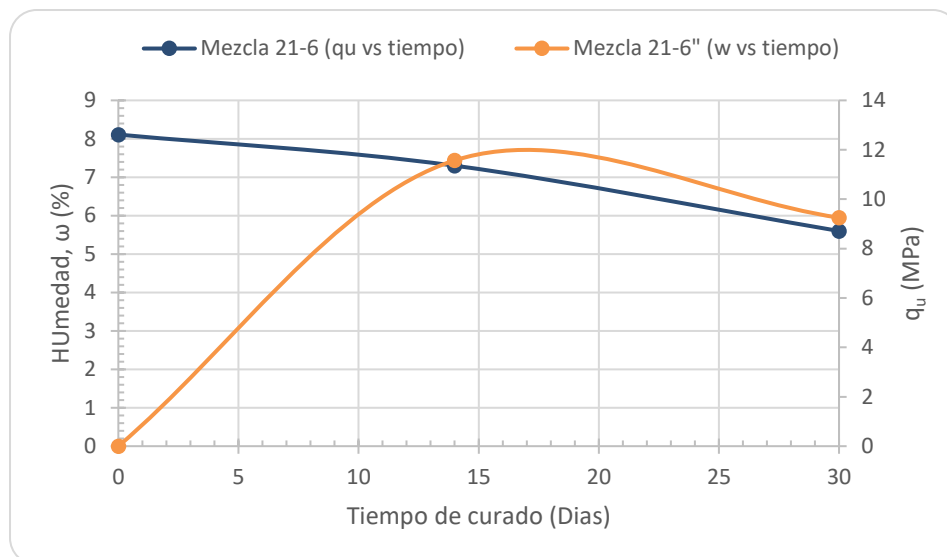


Figura 3.4-3 Relación entre las resistencias y las humedades de la mezcla 21-6 conforme avanza el tiempo de curado.

En la figura 3.4-4 se muestra cómo evoluciona a lo largo del tiempo de curado el módulo elástico, al igual que se hizo a la resistencia a compresión. Además, se puede observar, que un alto porcentaje de cemento provoca el aumento del módulo de deformación, de forma considerable, a excepción de la mezcla 21-6 que se ve afectada por la pérdida de humedad. El comportamiento de la mezcla 21-6 del módulo elástico con relación a tiempo de curado se asemeja con las mezclas que contiene poca cantidad de cemento.

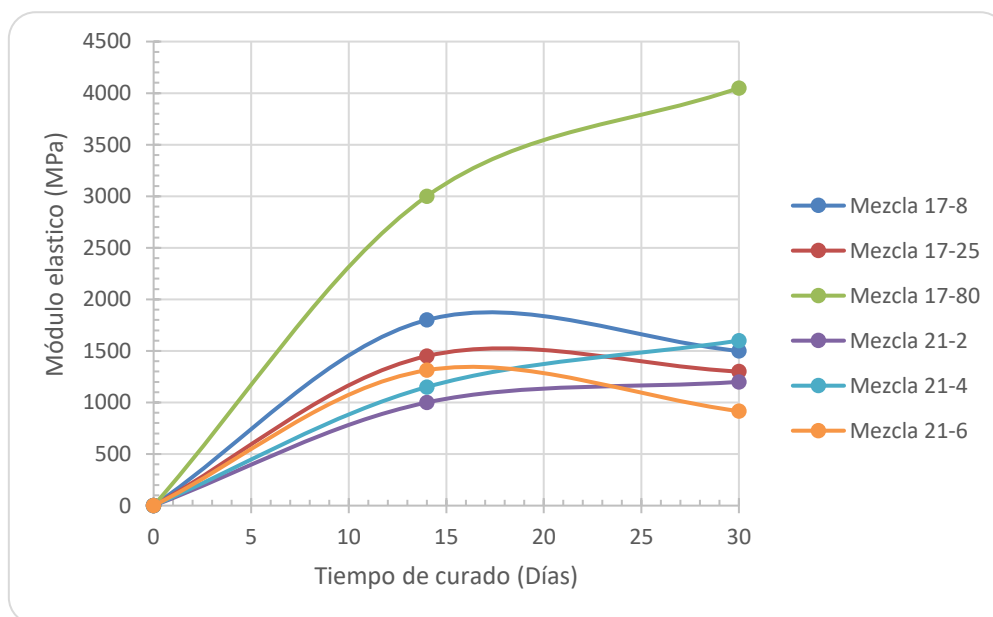


Figura 3.4-4 Variación del módulo de deformación durante el tiempo de curado de las muestras.

## 4. Ensayo de tensión indirecta.

La realización de este ensayo es de carácter importante ya que al realizarlo se obtendrán valores de comportamiento de las probetas en un estado de aplicación de carga en las generatrices de estas, siendo esto lo que se pretende obtener en el apartado del ensayo edométrico.

### 4.1. Descripción del ensayo.

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

Durante el ensayo debe asegurarse que la probeta permanece centrada cuando comienza la carga y durante la aplicación de esta el plato superior ha de estar paralelo con el inferior. Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango, por ejemplo, de 0.04 a  $0.06 \frac{MPa}{s} = \frac{N}{mm^2 * s}$ . La carga se aplica sin brusquedades y se incrementa continuamente, en la velocidad seleccionada  $\pm 1$  segundos, hasta que no soporte una carga mayor (AENOR, UNE 103400:1993. Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo, 1993).

La configuración de carga que se aplica sobre las probetas genera en todo el diámetro del plano de la carga un esfuerzo de tracción y logra así una rotura en todo el plano diametral. Para obtener la resistencia a la tracción indirecta se utiliza la siguiente ecuación:

$$\bullet \quad \sigma_{ct} = \frac{2F}{\pi L d} \quad (\text{Ecuación 4.1-1})$$

#### 4.2. Metodología.

Se ha ensayado 3 tipos de muestras diferentes tomando 2 probetas de cada una, con el objetivo de comprobar su resistencia a la tracción indirecta. Estas muestras son las mismas diseñadas para el estudio de esta investigación y agregando una última la cual se caracteriza por ser la misma muestra de 21-6 pero con la diferencia de que ha sido sumergida en agua durante una semana, para ver el comportamiento de las probetas saturadas. Estas probetas tendrán la siguiente notación:

- Probetas de las muestras de 21-2 (probeta1.21-2 y probeta2.21-2).
- Probeta de las muestras de 21-6 (probeta1.21-6 y probeta2.21-6).
- Probetas muestras de 21-6 con una semana de curado sumergida en agua (probeta1.21-6sat y probeta2.21-6sat).

Para realizar el ensayo se ha utilizado un equipo de aplicación de tracción indirecta en la prensa Wykeham Farrance como se puede visualizar en la ilustración 4.2-1, el cual consta con la facilidad de colocar un LVDT para medir los desplazamientos que ocurren al momento de aplicación de la carga.



*Ilustración 4.2-1 Equipo utilizado para la implementación de tracción indirecta.*

Para ensayar las probetas se tuvo que realizar un cambio en la geometría de las probetas, debido a que el equipo dispone de un soporte en el cual se colocan las probetas a ensayar con unas dimensiones de unos 50mm de longitud. Debido a ello se fabricaron probetas de unas dimensiones de más o menos la mitad de la altura de las probetas anteriormente fabricadas, dando como resultando probetas cilíndricas de diámetro de 38mm y altura de 39mm.

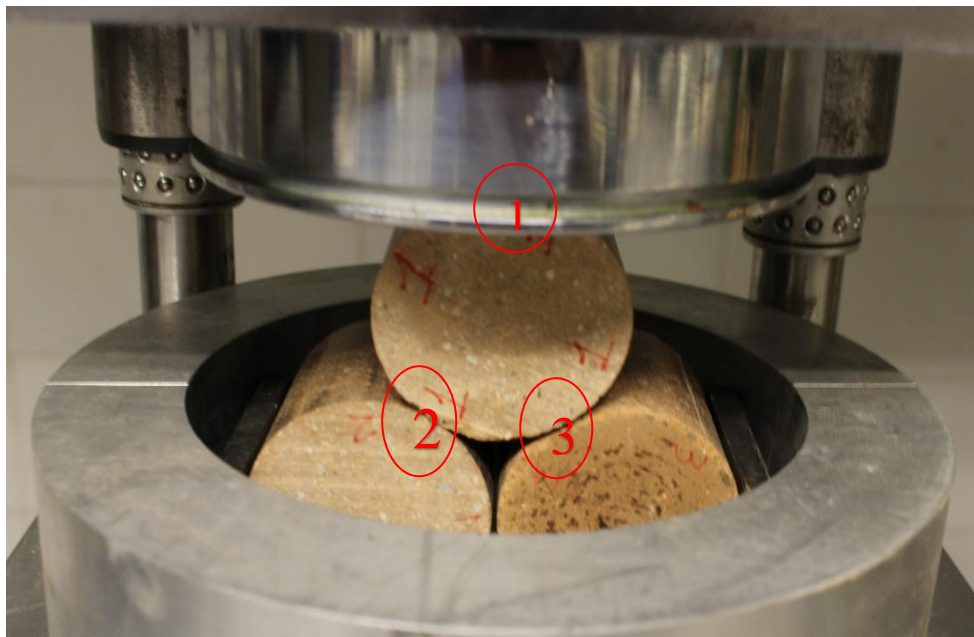
Conforme a estos ensayos realizados de tracción indirecta se ha experimentado realizar otros ensayos, de manera que la carga sea aplicada sobre la generatriz de las probetas que están en contacto con otras probetas. Para así analizar cómo influye la aplicación de carga sobre un conjunto de probetas que estén en contacto entre su generatriz. La ilustración 4.2-2 se observa el conjunto de muestras en contacto entre sí, antes de ser ensayadas.



*Ilustración 4.2-2 Conjuntos de probetas en contacto con su generatriz para realizar ensayo de tracción indirecta.*

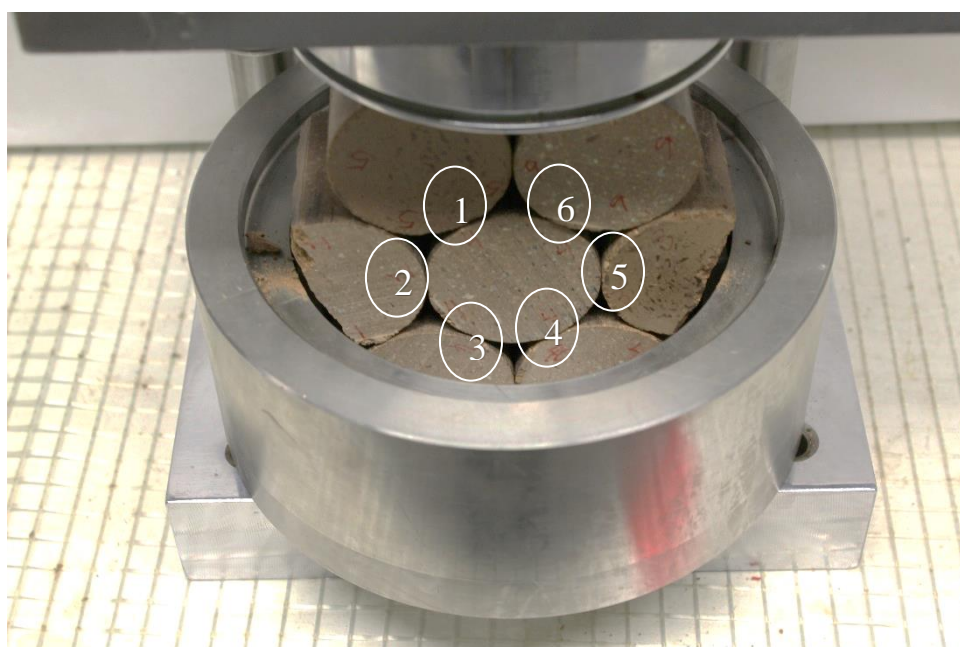
Para este ensayo se ha realizado 2 tipos de modelos, en los que se distinguen por medio de la cantidad de contacto que la probeta del centro este aplicada. La figura 4.2-3 muestra el primer ensayo experimental en el que la probeta inicial está sometida a 3 contactos en su generatriz. Y la ilustración 4.2-4 muestra el segundo ensayo donde se visualiza los contactos que esta aplicada la muestra del centro al momento de aplicarse la carga.





*Ilustración 4.2-3 Modelo del ensayo de tracción indirecta en el que representa la cantidad de contacto en la que está sometida las probetas.*

La ilustración 4.2-4 muestra el segundo ensayo realizado, donde se visualiza que la probeta del centro está sometida a 6 contactos con las demás probetas.



*Ilustración 4.2-4 Modelo del ensayo de tracción indirecta con más contacto entre las probetas.*

Lo que se busca al realizar estos ensayos es obtener la distribución de la fuerza aplicada en cada probeta y que resistencia soporta cada modelo. Teniendo los modelos ya definidos se realizó 1 ensayo por cada mezcla y por cada modelo. Estos ensayos tendrán la siguiente notación:

- Modelo1\_21-2.
- Modelo2\_21-2.
- Modelo1\_21-6.
- Modelo2\_21-6.

Siendo el modelo 1 el que contiene 3 contacto en sus generatrices.

### 4.3. Resultados obtenidos.

A continuación se muestra los valores obtenidos de los ensayos de tracción indirecta en cada una de las probetas. La tabla 4.3-1 muestra los valores de la resistencia a tracción indirecta y los valores del módulo que se obtuvo en cada probeta.

*Tabla 4.3-1 Resultados de las resistencias a tracción indirecta y módulos resistentes obtenidos.*

	<b>fct (MPa)</b>	<b>Et (MPa)</b>
<b>Probeta1.21-2</b>	0.726	146.59
<b>Probeta2.21-2</b>	0.839	161.66
<b>Probeta1.21-6</b>	2.295	287.49
<b>Probeta2.21-6</b>	2.043	245.99
<b>Probeta1.21-6.sat</b>	0.959	173.99
<b>Probeta2.21-6.sat</b>	1.109	194.61

Se puede observar en la tabla que los valores más altos de resistencias son las probetas que tienen las mezclas con mayor cantidad de cemento, aun así para el caso de las muestras que estuvieron una semana sumergidas en agua. En la figura 4.3-1 se tienen graficado las 3 probetas con mayor de las resistencias con respecto a la deformación de cada probeta.



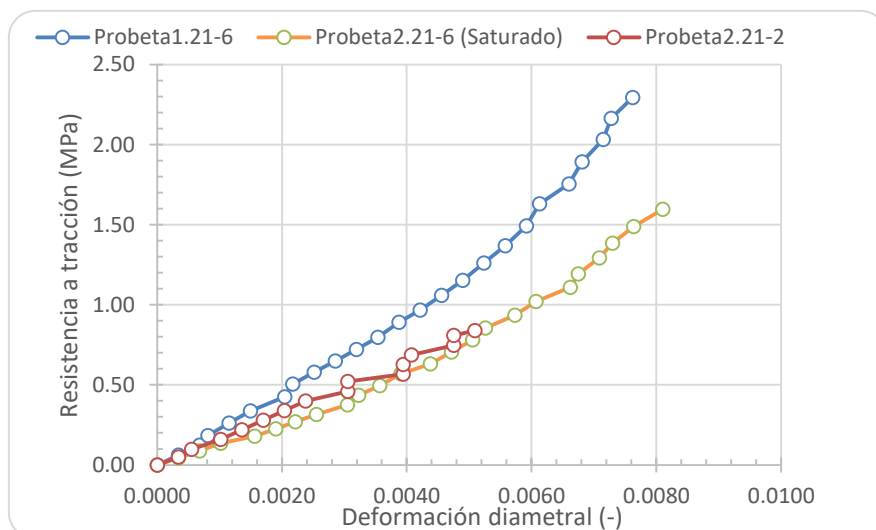


Figura 4.3-1 Curva de resistencia a tracción con deformación diametral, en la que se obtiene el módulo resistente a tracción.

En la tabla 4.3-2 contiene los valores de los esfuerzos aplicados en los modelos experimentales, Como es de esperarse las probetas con mezcla de mayor cantidad de cemento son las que han resistido mayor esfuerzo.

Estos valores se calcularon utilizando la misma fórmula descrita anteriormente, solo tomando en cuenta que para el modelo 2 el diámetro será la suma de los 2 diámetros en los que se aplica directamente la carga.

Tabla 4.3-2 Esfuerzo a tracción indirecta máximo soportado por cada modelo.

Mezcla	Fct (MPa)	
	Modelo 1	Modelo 2
21-2	1.08	1.10
21-6	3.43	2.82

En la ilustración 4.3-1 muestras el tipo de rotura que han sufrido las 2 muestras 21-2 y 21-6 del modelo 1, siendo la de la izquierda "Modelo1\_21-2 y la de la derecha "Modelo1\_21-6".



*Ilustración 4.3-1 Rotura a tracción indirecta del modelo 1 para las diferentes mezclas diseñadas.*

Como se puede notar en la ilustración 4.3-1 en el “modelo1\_21-2” la probeta colocada en el centro ha sido la que más se ha deformado debido a ser la que recibe directamente la carga aplica. Pero en el “modelo1\_21-6”, la probeta colocada en el centro resiste aún más y al ser más rígida logra transferir la carga aplica a las demás probetas ubicada debajo de ella.

En la ilustración 4.3-2 muestra las roturas a tracción indirecta del modelo 2 de cada mezcla, se puede observar que la probeta que está ubicada en el centro no ha sufrido ningún tipo de rotura. Este comportamiento se atribuye al confinamiento que la probeta del centro está sometida haciendo que esta sea más resistente a la aplicación de la carga.



*Ilustración 4.3-2 Fotografía de las roturas producidas a las probetas del modelo 2 debido al ensayo de tracción indirecta.*

#### 4.4. Análisis de los resultados.

Es importante realizar una comparación de los parámetros obtenidos en este ensayo con todas las muestras estudiadas en los trabajos previos y las muestras fabricadas en esta investigación con el objetivo de analizar el comportamiento de las probetas con diferentes densidades y humedades sometidas a un estado de tracción indirecta.

La tablas 4.4-1 muestran los valores de la resistencia a tracción indirecta y los módulos resistentes de los trabajos previos y siendo los 3 últimos los realizados en esta investigación. En ella se observa que a mayor cantidad de cemento tenga la mezcla mayor resistencia se va obteniendo. También se visualiza la similitud de los valores obtenidos con las mezclas de 21-2 en relación a la resistencia.

Tabla 4.4-1 Comparación de los resultados de las resistencias a tracción indirecta y módulos resistentes obtenidos en los estudios previo y los analizados en esta investigación.

Tipo de mezcla	fct (MPa)	Et (MPa)
17-8	0.25	85.245
17-25	0.672	320.55
17-80	2.366	1564.2
21-2	0.811	312.39
21-4	1.079	512.12
*21-2	0.782	154.125
*21-6	2.169	266.74
*21-6.sat	1.034	184.3

Si estos valores los comparamos con los datos de la compresión simple media se obtiene el gráfico 4.4-1, en donde se puede obtener que la resistencias a tracción media es el 19.05% de la compresión simple obtenida en las probetas analizadas.

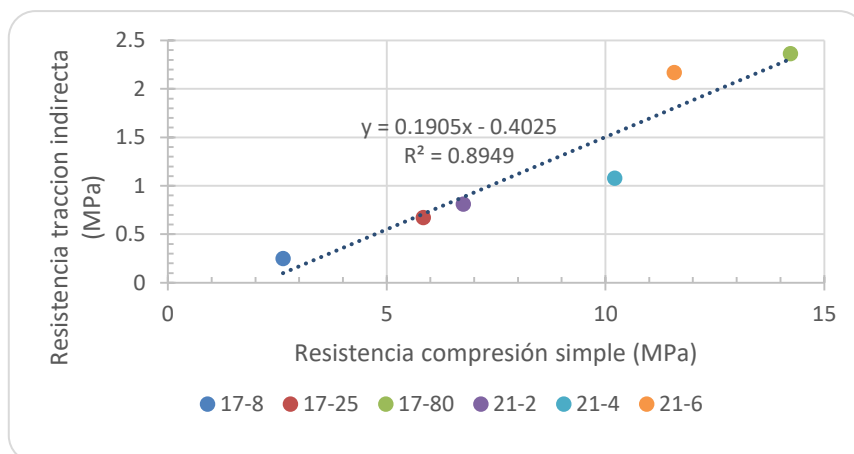


Figura 4.4-1 Gráfico que relaciona la resistencia a compresión simple y la resistencia a tracción indirecta.

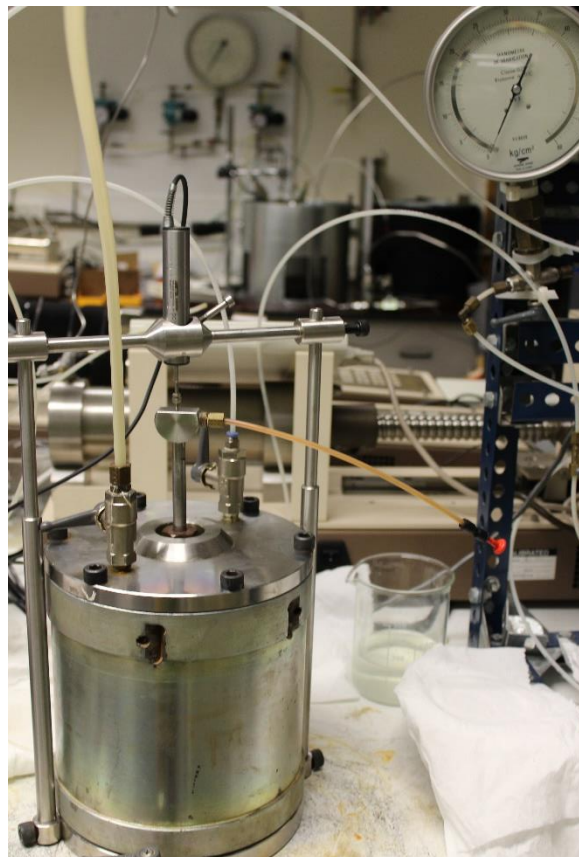
## 5. Ensayo Edométrico con presión controlada.

Habiendo estudiando los comportamientos de las probetas en condiciones de compresión uniaxial y tracción indirecta, es importante entender su comportamiento de compresibilidad, para ellos se procederá a realizar ensayos edométricos que a continuación se describe la ejecución, equipos y demás características de los ensayos realizados.

### 5.1. Descripción del ensayo.

Los ensayos edométricos se han realizado utilizando un edómetro diferente al convencional, el cual tiene la capacidad de colocar un grupo de probetas diseñadas, para analizarlas en conjunto, tomando en cuenta la organización de las mismas dentro del edómetro.

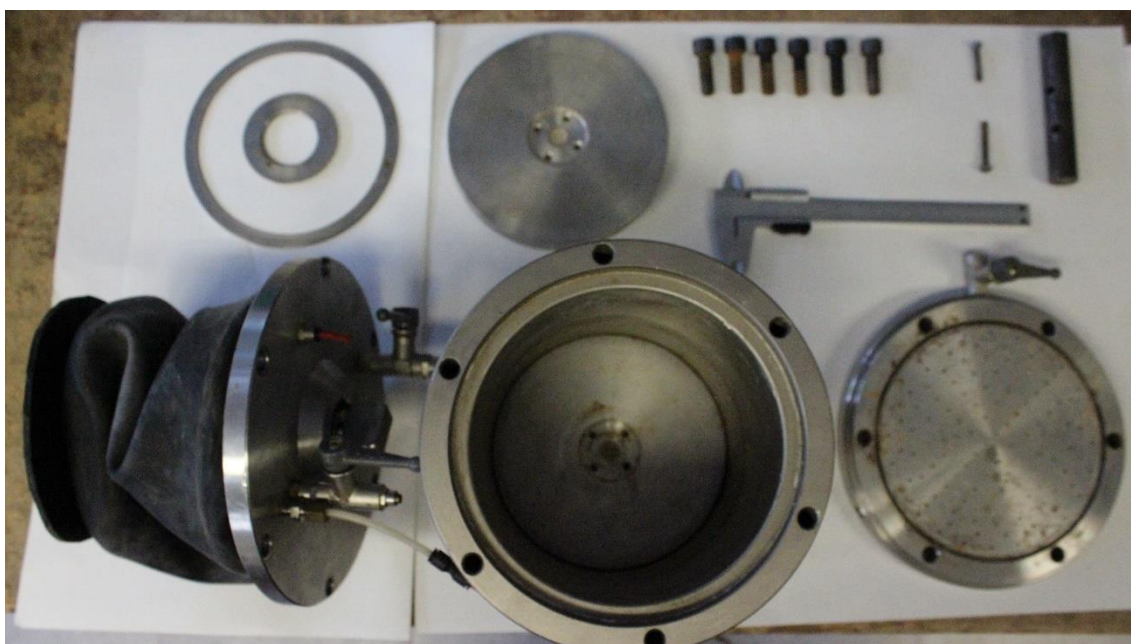
El equipo utilizado para estudiar la capacidad de compresión de las probetas diseñadas es un edómetro tipo Rowe, dispone de unas dimensiones de 150mm de diámetro interior y una altura interior aproximada de 180mm, como se visualiza en la ilustración 5.1-1.



*Ilustración 5.1-1 Fotografía del edómetro tipo Rowe utilizado para ensayar las probetas diseñadas.*



La carga se aplica a través de una placa de acero inoxidable. El cabezal superior se desplaza con la deformación de la probeta y el inferior se mantiene fijo. El desplazamiento del cabezal superior se mide mediante un vástago vertical que sale al exterior de la celda y cuya punta permanece apoyada en el centro del cabezal durante todo el ensayo. Las medidas de deformación vertical están automatizadas mediante un LVDT con un recorrido de hasta 13 mm, montado en un marco indeformable, formado por dos barras rígidas de acero que sujetan el marco. Ambos cabezales poseen un sistema de drenaje que permite la inundación de la muestra durante el ensayo (Cañavate Grimal, 2010). La figura 5.1-2 muestra los componentes individuales que conforman el edómetro tipo Rowe.



*Ilustración 5.1-2 Componentes individuales del edómetro tipo Rowe utilizado.*

El método de carga de este equipo consiste en aplicación de presión de aire directamente sobre la parte superior. Se utiliza una membrana de látex la cual separa la presión de aire de las probetas a comprimir, como se muestra en la ilustración 5.1-3.

Mediante un sistema de adquisición de datos por ordenador se registraron las lecturas de desplazamiento vertical del cabezal de la probeta y la aplicación de carga por medio de la presión de aire.

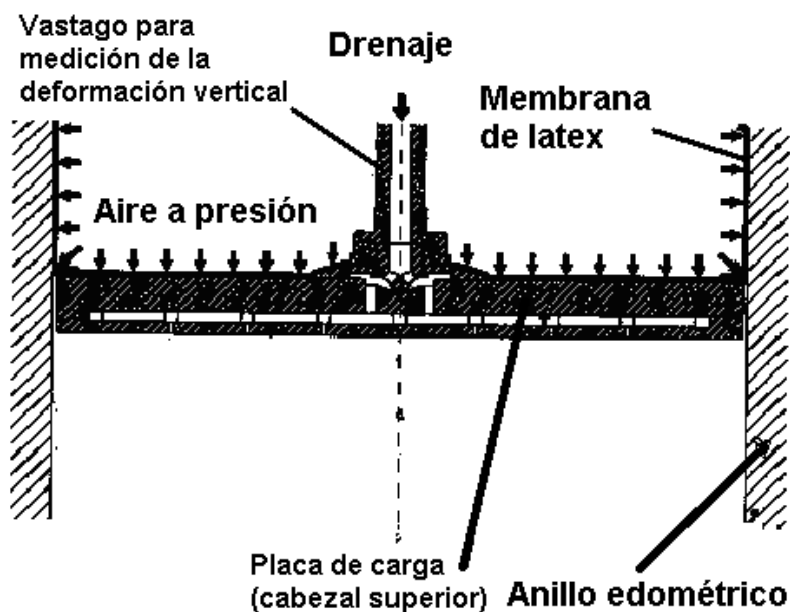


Ilustración 5.1-3 Detalles de diseño de la placa de carga y del vástago para drenaje y medida del desplazamiento vertical del edómetro (Cañavate Grimal, 2010).

Para analizar la compresibilidad de las probetas se ha pensado colocarlas de manera que ocupen la mayor cantidad del diámetro interior del edómetro. Se colocaron de manera que la carga sea aplicada a la generatriz de todas las probetas colocadas en el edómetro, como se visualiza en la ilustración 5.1-4, de igual manera que se colocaron para realizar la tracción directa en el apartado 4.2.

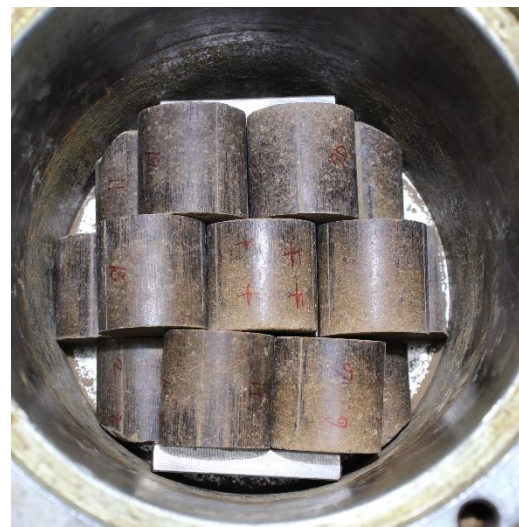


Ilustración 5.1-4 Modelo de la colocación de las probetas en el edómetro.

Para aprovechar la altura del edómetro se colocaron 3 capas de probetas ubicadas de forma que no se desplacen al momento de aplicación de carga. En la primera capa se colocaron 10 probetas (ilustración 5.1-5), en la segunda capa 7 probetas (ilustración 5.1-6) y en la tercera y última capa 10 probetas (ilustración 5.1-7). Cabe destacar que para la correcta colocación de las probetas se tuvo que acondicionar las muestras que están colocadas en las esquinas. Como es un molde de geometría circular también se han colocado unas láminas rectangulares de acero para evitar el movimiento de las probetas.



*Ilustración 5.1-6 Primera capa de 10 probetas.*



*Ilustración 5.1-5 Segunda capa de 7 probetas.*



*Ilustración 5.1-7 Tercera y última capa de 10 probetas*



## 5.2. Metodología.

En esta investigación se han realizado 3 ensayos edométricos con presión controlada los cuales tienen la siguiente nomenclatura y descripción:

1. 1900kPa\_21-6\_seco.
2. 1900kPa\_21-6\_sat.
3. 1000kPa\_21-2\_sat.

Esta nomenclatura define los procesos en los cuales las probetas han sido ensayadas. La primera parte representa la tensión vertical máxima a alcanzar que son 1900kPa o 1000kPa, el segundo categoriza los ensayos debido al tipo de mezcla de las probetas 21-6 o 21-2 y el tercero hace referencia al tipo de ensayo que tanto son seco o saturado.

El grafico 5.2-1 muestra la trayectoria de tensiones en las que los ensayos han sido realizados, esta trayectoria se representa como un diagrama de flujo adimensional debido a que en esta investigación no se ha tomado en cuenta la succión en la cual están sometidas las probetas.

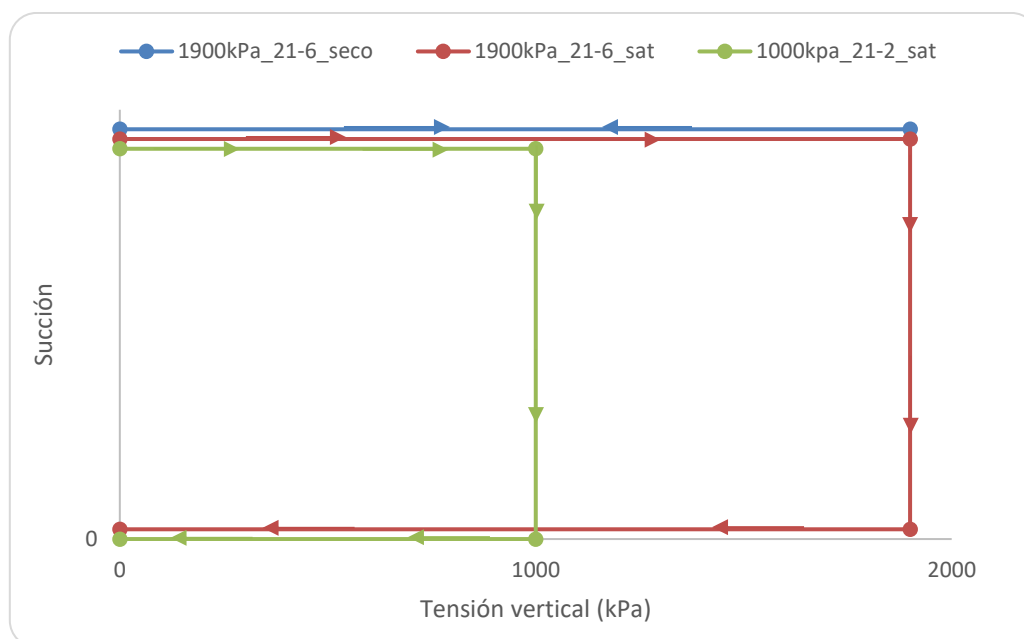


Figura 5.2-1 Trayectoria de tensiones en las que han sido sometido los ensayos.



**1900kPa\_21-6\_seco.**

En primer lugar se colocan las probetas y se instala la placa de acero inoxidable porosa del edómetro para luego tomar las medidas iniciales de la altura de toda las probetas en conjunto, con el objetivo de comprobar el desplazamiento obtenido en el ensayo.

Para este primer ensayo se procede a ensayar la muestra en un estado seco, el cual consiste en cargar la muestra durante un tiempo de 2 horas hasta llegar una tensión máxima de 1900 kPa, luego de transcurrido este tiempo se aplica la descarga con la misma duración de la carga, llegando a ser un ensayo de 4 horas de duración.

Para finalizar se vuelve a medir la altura de todas las probetas y se extrae todas estas para observar cuales han sufrido roturas o deformaciones.

**1900kPa\_21-6\_sat.**

Para este ensayo se utilizaron las mismas probetas utilizadas en el ensayo de 1900kPa\_21-6\_seco. Se colocan las probetas en la misma ubicación que tenían en el ensayo inicial y se vuelve a medir la altura inicial que tiene.

Teniendo ya el edómetro preparado para iniciar el ensayo se ha aplicado una tensión de 1900kPa en un intervalo de 2 horas, para luego completado este tiempo se procede a llenar la célula con agua destilada por la válvula inferior del edómetro, utilizando un pistón automático de una capacidad volumétrica de 200 m<sup>3</sup>. Se va introduciendo el agua hasta que salga por la válvula de la parte superior del edómetro.

Luego de saturar las probetas, se deja por un tiempo estimado de 2 días con la carga constante. Terminado este tiempo se realiza la descarga con un intervalo de tiempo de 2 horas. Cuando se termina el ensayo se mide la altura final y se retira toda el agua de la célula.

### 1000kPa\_21-2\_sat.

Este último ensayo al igual que los anteriores se hace las medidas iniciales de altura y peso. Se procede a realizar una trayectoria de carga-saturación-descarga. Se aplica una tensión vertical de 1000 kPa en un intervalo de 2 horas. Se satura la muestra dando un margen de tiempo de 2 días saturadas con la carga aplicada constante y para finalizar se realiza la descarga con el mismo intervalo de tiempo que la carga. Se mide las alturas finales y se extrae el agua.

En este último ensayo a diferencia de los demás, se ha realizado una granulometría de las probetas ya que como se verá en el apartado 5.3, las probetas tuvieron un mayor nivel de rotura que las demás, obteniendo diferentes tamaños de partículas.

### 5.3. Resultados obtenidos.

A continuación se describirá los resultados obtenidos por cada uno de los ensayos individuales.

### 1900kPa\_21-6\_seco.

Este ensayo se realizó un estado de carga-descarga en condiciones secas con la finalidad de observar la compresibilidad de las probetas de mezcla 21-6. La tabla 5.3-1 muestra los datos medidos de este ensayo y la figura 5.3-1 muestra el comportamiento de la carga vertical y el desplazamiento vertical con relación al tiempo. Se produce un ligero hinchamiento en las probetas debido a la descarga realizada.

Tabla 5.3-1 Tabla de los valores medidos del ensayo 1900kPa\_21-6\_seco.

Datos medidos		
<b>Masa<sub>total</sub> =</b>	2429.57	g
<b>H<sub>molde</sub> =</b>	206.00	mm
<b>H<sub>tapa</sub> =</b>	17.00	mm
<b>H<sub>molde</sub>-H<sub>tapa</sub> =</b>	189.00	mm
<b>H<sub>inicial</sub> =</b>	83.72	mm
<b>H<sub>final</sub> =</b>	85.62	mm
<b>H<sub>final</sub>-H<sub>inicial</sub> =</b>	1.90	mm

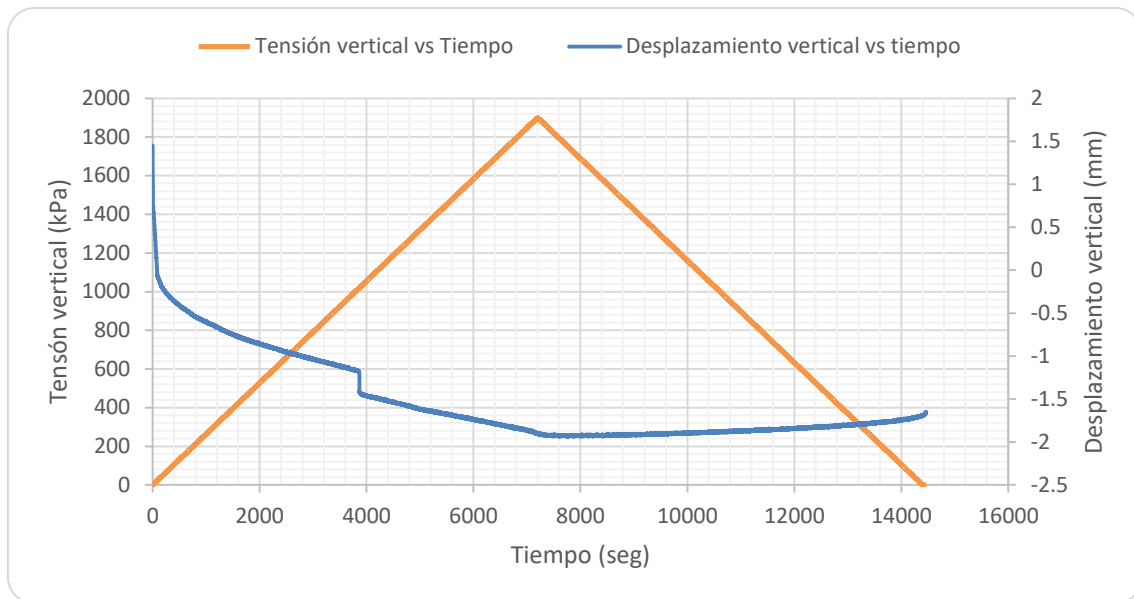


Figura 5.3-1 Gráfico de las tensiones verticales y desplazamiento vertical con relación al tiempo del ensayo 1900kPa\_21-6\_seco.

En este gráfico se puede notar que existe una caída en el desplazamiento de manera lineal, lo que se atribuye a una rotura considerable de las probetas ensayadas, la figura 5.3-2 se puede observar con mayor claridad la caída lineal del desplazamiento con una dotación de 0.24mm, siendo un 14% de desplazamiento total del ensayo.

La ilustración 5.3-1 muestra las probetas luego de ser ensayadas, dando como resultado que solo 2 de ellas llegaron a la rotura. Se obtiene un desplazamiento total de 1.70mm

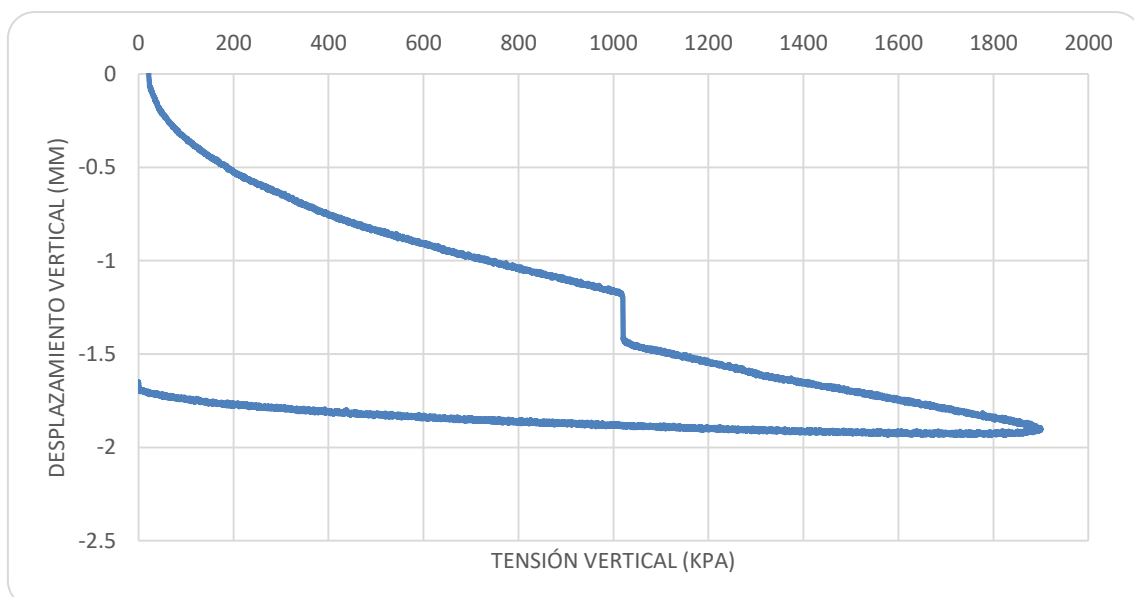


Figura 5.3-2 Gráfico que relaciona el desplazamiento vertical con la tensión vertical del ensayo 1900kPa\_21-6\_seco.



*Ilustración 5.3-1 Fotografía del ensayo 1900kPa\_21-6\_seco luego de haber terminado el estado de tensiones, representando las rotura en las probetas.*

Retirando las probetas del edómetro se logró visualizar que algunas de las probetas no lograron la rotura total, pero si llegaron a fisurarse que se muestra en la ilustración 5.3-2.



*Ilustración 5.3-2 Probeta fisurada debido al estado de carga-descarga del ensayo 1900kPa\_21-6\_seco.*

En la ilustración 5.3-3 se muestran las probetas que han sido afectadas por el estado de carga-descarga del ensayo.



Ilustración 5.3-3 Fotos de las 2 probetas que han sufrido rotura debido al estado tensional del ensayo 1900kPa\_21-6\_seco.

### 1900kPa\_21-6\_sat.

Como se explica anteriormente este ensayo se ejecuta con las mismas probetas de ensayo 1900kPa\_21-6\_seco, colocadas de la misma manera en la que se colocó anteriormente, con el objetivo de observar cómo se comporta estas probetas en un estado de carga-saturación-descarga. La tabla 5.3-2 muestra los valores medidos tanto iniciales como finales.

Tabla 5.3-2 Valores medidos antes y después de iniciar el ensayo 1900kPa\_21-6\_sat.

Datos medidos		
<b>Masa<sub>inicial</sub> =</b>	2429.57	g
<b>H<sub>molde</sub> =</b>	206.00	mm
<b>H<sub>tapa</sub> =</b>	17.00	mm
<b>H<sub>molde</sub> - H<sub>tapa</sub> =</b>	189.00	mm
<b>H<sub>i</sub> =</b>	84.62	mm
<b>H<sub>f</sub> =</b>	88.54	mm
<b>H<sub>final</sub> - H<sub>inicial</sub> =</b>	3.92	mm

La figura 5.3-3 muestra los datos obtenidos en este ensayo en relación a la tensión vertical y el desplazamiento vertical con el tiempo total del ensayo. Se puede observar que debido a la inundación de las probetas todo el sistema sufre un desplazamiento vertical total de 3.59mm, teniendo una diferencia de 0.33 mm con el valor medido manualmente con las alturas iniciales y finales del conjunto de probetas, esto es debido a los errores al momento de tomar las medidas de las alturas.



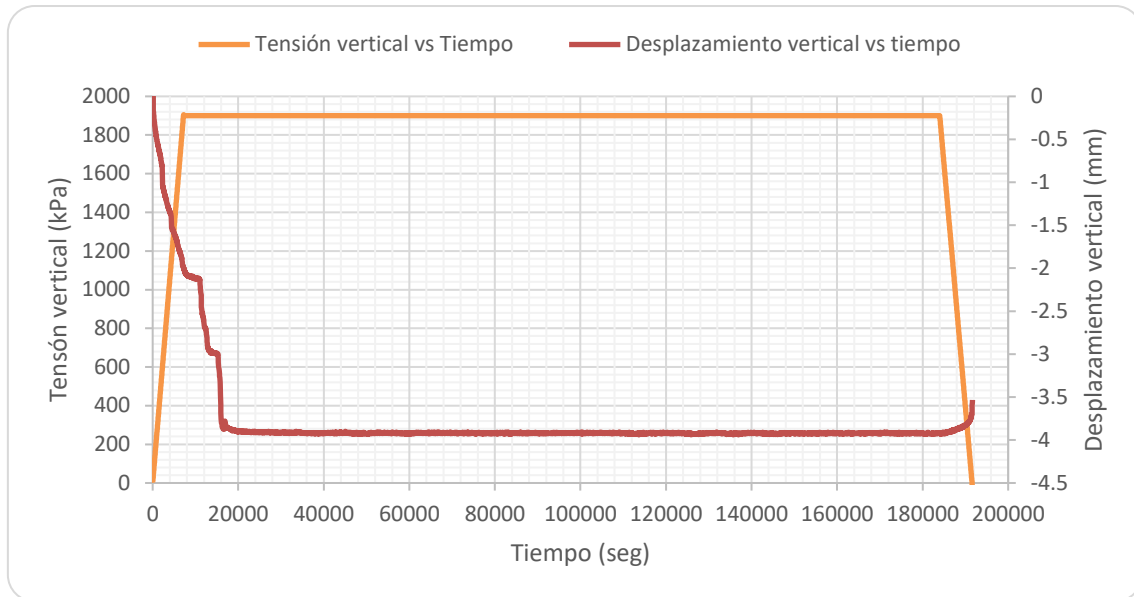


Figura 5.3-3 Gráfico de las tensiones verticales y desplazamiento vertical con relación al tiempo del ensayo 1900kPa\_21-6\_sat.

Conforme va avanzado la carga las probetas van teniendo un desplazamiento vertical considerable de un valor de 1.98mm, pero el factor que hace que el desplazamiento sea mayor que el ensayo 1900kPa\_21-6\_seco es la saturación de la célula de carga, teniendo un desplazamiento en esta fase de 1.94mm, como se puede observar en la figura 5.3-4 en la que representa el desplazamiento vertical con relación a la tensión vertical aplicada.

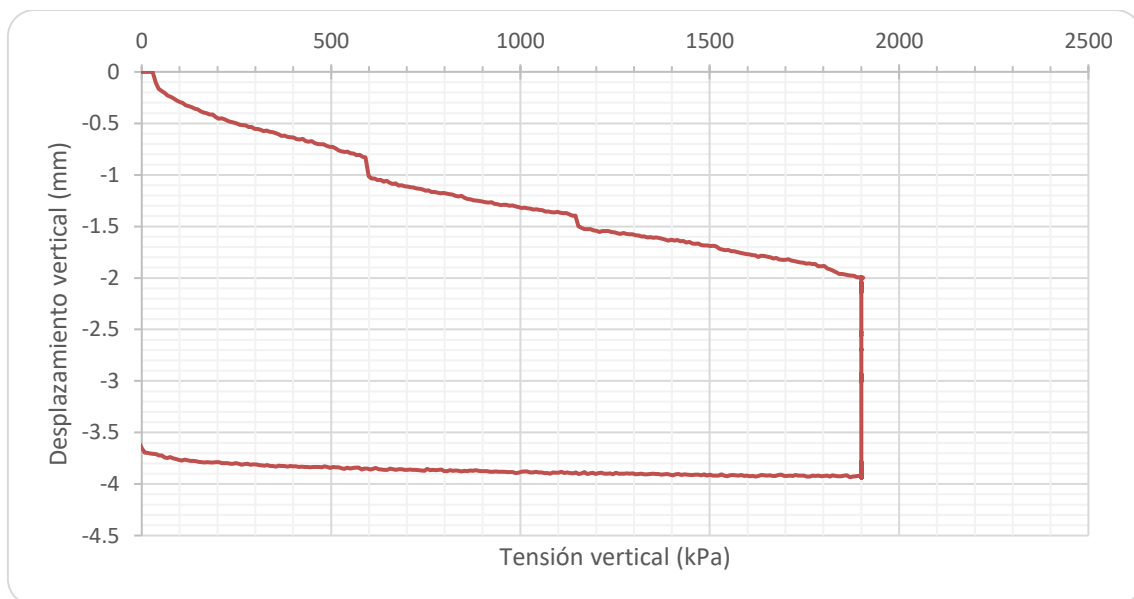


Figura 5.3-4 Gráfico que relaciona el desplazamiento vertical con la tensión vertical del ensayo 1900kPa\_21-6\_sat.

La ilustración 5.3-4 presenta las probetas justo en el momento de haber terminado el ensayo, en el que se percibe que existen más probetas con rotura que en el ensayo 1900kPa\_21-6\_seco.



*Ilustración 5.3-4 Fotografía del ensayo 1900kPa\_21-6\_sat luego de haber terminado el estado de tensiones, representando las roturas en las probetas.*

Se retiran todas las muestras del edómetro para visualizar su estado de rotura, lo cual se puede ver en la ilustración 5.3-5. Se demuestra que las probetas sufrieron mayor deformación que el ensayo anterior, ya que más del 50% de las probetas están en estado de rotura. Otro criterio que se puede observar es los tipos de rotura, han sufrido las probetas que en se muestran en la ilustración 5.3-6, los cuales son similares a las roturas obtenidas en los ensayos de tracción indirecta.



*Ilustración 5.3-5 Estado de las probetas del ensayo 1900kPa\_21-6\_sat luego de haber terminado.*



Ilustración 5.3-6 Tipos de roturas de las probetas en el ensayo 1900kPa\_21-6\_sat.

### 1000kPa\_21-2\_sat.

La tabla 5.3-3 muestra los valores medidos antes y después de iniciar el ensayo, teniendo un desplazamiento total de 19.32mm siendo este de una magnitud bastante alta en comparación con los demás ensayos. Esto se atribuye a que las probetas contiene menos cantidad de cemento y son más susceptibles a la presencian de agua. En la figura 5.3-5 se grafica el desplazamiento vertical y la tensión vertical con relación al tiempo de duración del ensayo.

Tabla 5.3-3 Valores medidos antes y después de iniciar el ensayo 1000kPa\_21-2\_sat.

Datos medidos	
<b>Masa<sub>inicial</sub> =</b>	2662.58 g
<b>H<sub>molde</sub> =</b>	206.00 mm
<b>H<sub>tapa</sub> =</b>	17.00 mm
<b>H<sub>molde</sub> - H<sub>tapa</sub> =</b>	189.00 mm
<b>H<sub>i</sub> =</b>	84.81 mm
<b>H<sub>f</sub> =</b>	104.13 mm
<b>H<sub>final</sub> - H<sub>inicial</sub> =</b>	19.32 mm



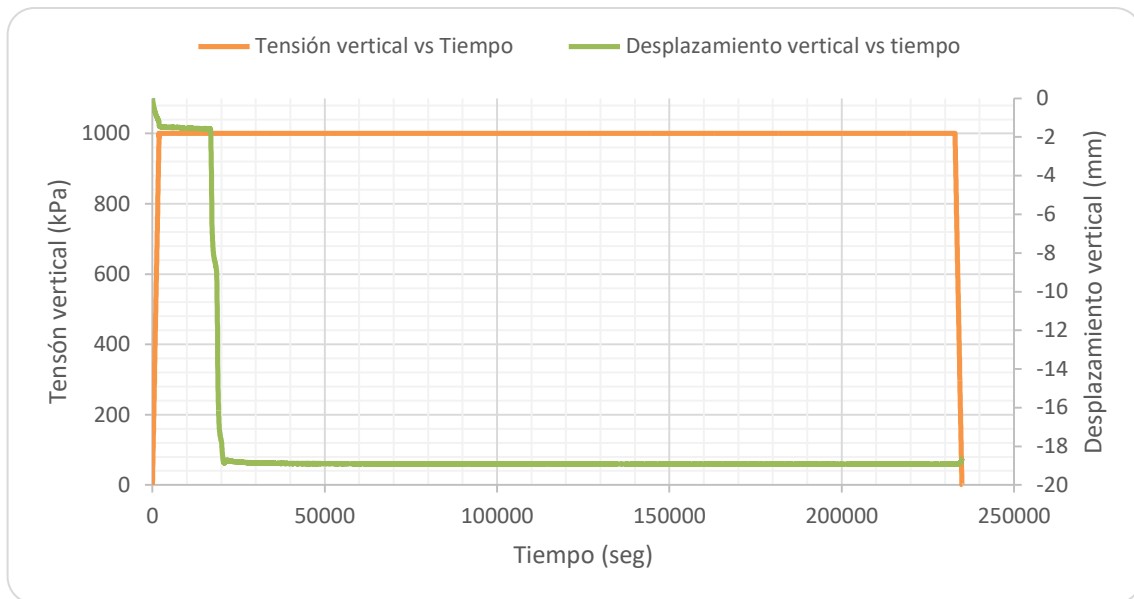


Figura 5.3-5 Gráfico de las tensiones verticales y desplazamiento vertical con relación al tiempo del ensayo 1000kPa\_21-2\_sat.

En la figura 5.3-5 se puede ver como al igual que en el ensayo 1900kPa\_21-6\_sat como el desplazamiento se va incrementando debido a la presencia de agua en el sistema. La relación del desplazamiento vertical y la tensión vertical de la figura 5.3-6, muestran como el desplazamiento debido a la carga solo es un 6% del desplazamiento total.

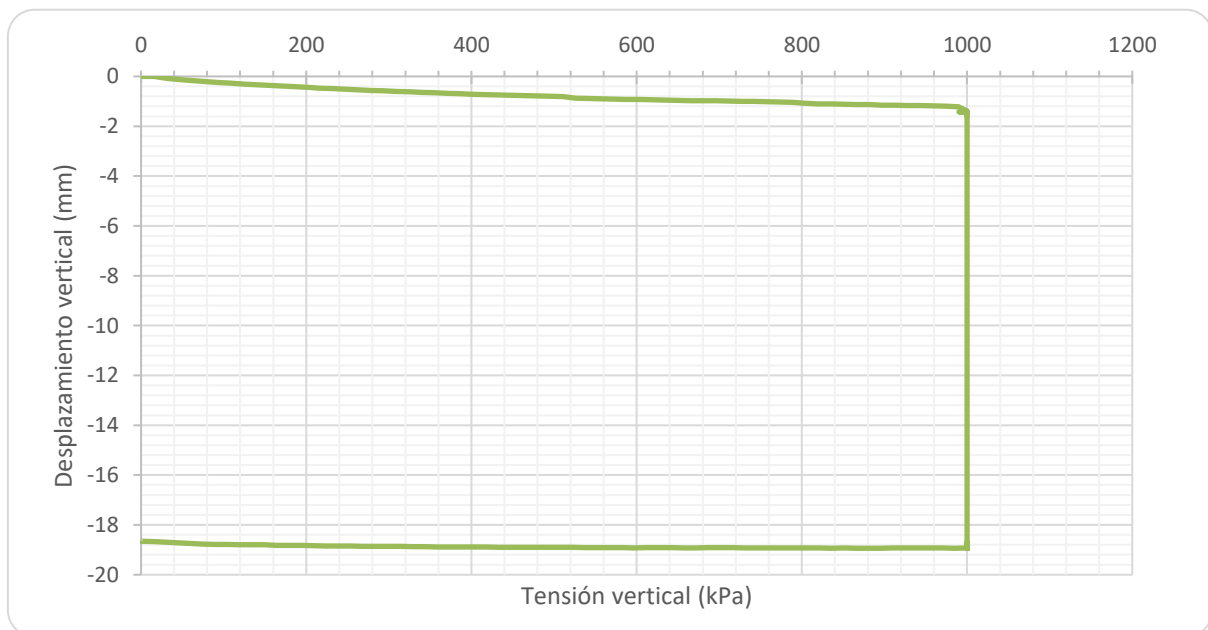


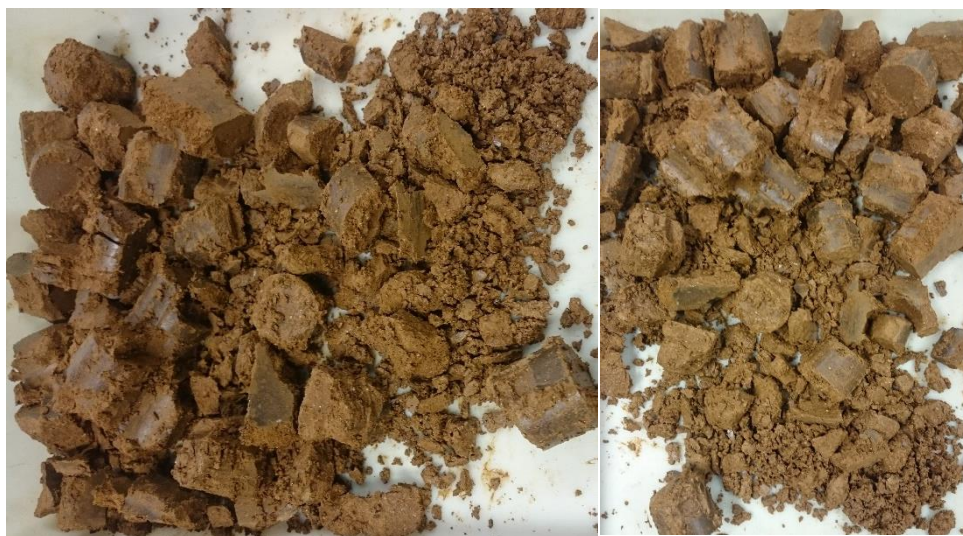
Figure 5.3-6 Gráfico que relaciona el desplazamiento vertical con la tensión vertical del ensayo 1000kPa\_21-2\_sat.

La ilustración 5.3-7 muestra el estado en que ha quedado las probetas del ensayo, ya viendo los resultados obtenidos del edómetro, se espera obtener unas probetas totalmente destrozadas y con una compresibilidad mucho mayor que las probetas de los ensayos anteriores.



*Ilustración 5.3-7 Estado de las probetas del ensayo 1000kPa\_21-2\_sat después de terminado.*

En la ilustración 5.3-8 se muestran las probetas fuera de la célula de carga del edómetro y se visualiza que se obtiene unas muestras con diferentes tamaños de partículas, por lo que se procede a dejar secar la muestra para realizar un ensayo granulométrico con el objetivo de clasificar el porcentaje de partículas que estas probetas resultaron luego de ser ensayadas en el edómetro.



*Ilustración 5.3-8 Material obtenido del ensayo edométrico 1000kPa\_21-2\_sat.*

### Ensayo granulométrico 1000kPa\_21-2\_sat.

Debido a las deformaciones obtenidas en el ensayo edométrico de las mezclas de 21-2, se ha realizado un ensayo granulométrico, ya que las probetas han quedado con diferentes tamaños de partículas.

Las bandejas o tamices normalizados (AENOR, UNE 103-101-95- Análisis granulométrico de suelos por tamizados, 1995) que se han utilizado son de la abertura: 76.2, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 12.7, 9.5, 6.3, 4.7, 2.00, 0.84, 0.42, 0.25, 0.14, 0.07 mm, siendo estos lo que están disponibles en el laboratorio de mecánica de suelo de la UPC.

La tabla 5.3-4 muestra los valores obtenidos por el ensayo granulométrico realizado.

Malla	Abertura mm	Peso retenido g	Parcial retenido %	Acumulado	% Que pasa
3"	76.2	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2 "	38.1	890.35	33.70	33.70	66.30
1"	25.4	427.85	16.20	49.90	50.10
3/4"	19.1	227.48	8.61	58.51	41.49
1/2"	12.7	199.93	7.57	66.08	33.92
3/8"	9.5	75.75	2.87	68.95	31.05
No.4	4.7	179.66	6.80	75.75	24.25
No. 10	2.00	130.77	4.95	80.70	19.30
No. 20	0.84	116.94	4.43	85.12	14.88
No. 40	0.42	87.60	3.32	88.44	11.56
No. 60	0.25	40.53	1.53	89.97	10.03
No. 100	0.14	32.12	1.22	91.19	8.81
No. 200	0.07	13.12	0.50	91.69	8.31

La figura 5.3-7 muestra el gráfico de a curva granulométrica realizado gracias a los datos obtenidos en el ensayo granulométrico. La ilustración 5.3-9 muestra cada uno de los suelos retenidos en los respectivos tamices

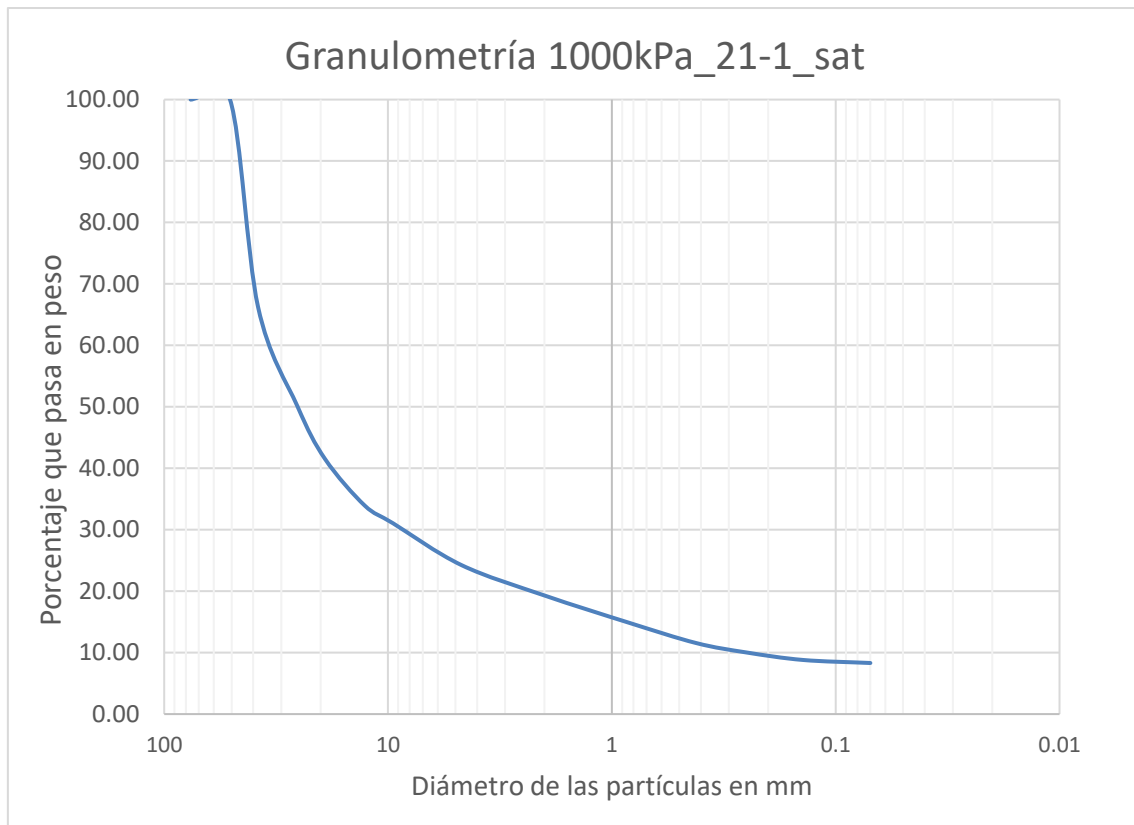


Figure 5.3-7 Curva granulométrica obtenida mediante los resultados del ensayo 1000kPa\_21-2\_sat.



Ilustración 5.3-9 Fotografía de los porcentajes retenidos en los tamices del ensayo granulométrico 1000kPa\_21-2\_sat.



#### 5.4. Análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos del ensayo edométricos con presión controla es importante comentar las deformaciones que sufren las probetas. Con la figura 5.4-1 que grafica los valores de los desplazamientos verticales con relación la tensión vertical de todos los ensayos en conjunto, se puede notar que interviene 2 tipos de deformaciones ocasionadas por factores distintos. Estos factores se le atribuyen la aplicación carga y al momento de saturar la muestra. Esta última siendo la más significativa de todas ya que al momento de inundar las probetas, estas se debilitan haciendo a fin que ocurra mayor deformaciones.

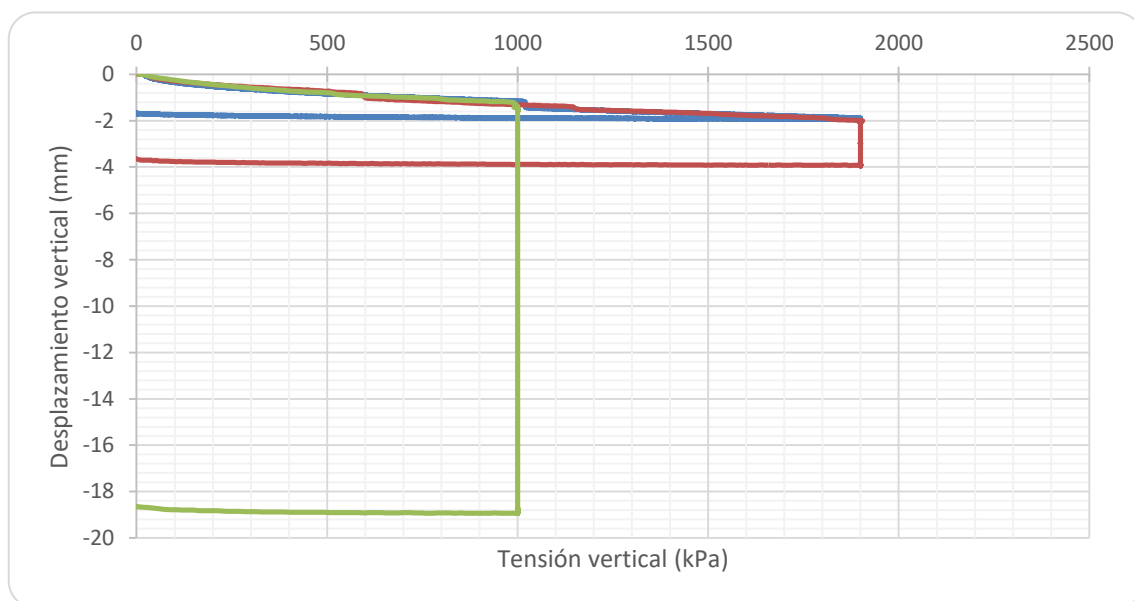


Figura 5.4-1 Grafico del desplazamiento vertical en relación con la tensión vertical en los 3 ensayos.

Si hacemos un análisis de las deformaciones que ocurren al momento de aplicar la carga obtenemos la figura 5.4-2, en la que se puede notar como en el aspecto de la rigidez las deformaciones se comportan de manera similar hasta llegar a la carga de 1000kPa. Ya en esta etapa es donde se satura el ensayo 1000kPa\_21-1\_sat y las demás mantienen la misma tendencia de deformación, por ser ensayos de aplicación de carga de 1900kPa y mismo diseño de mezcla. Pero cuando se realiza la saturación del ensayo 1900kPa\_21-6\_sat es donde empiezan a ocurrir los cambios entre ellas.

Este comportamiento se puede apreciar en la figura 5.4-3 que relaciona el desplazamiento vertical con el tiempo del ensayo, en donde todos los ensayo al momento de aplicar la carga podría decirse que ocurre una deformación instantánea, pero conforme va

avanzando el tiempo el comportamiento de ensayo 1000kPa\_21-2\_sat se va diferenciando de los demás ensayos.

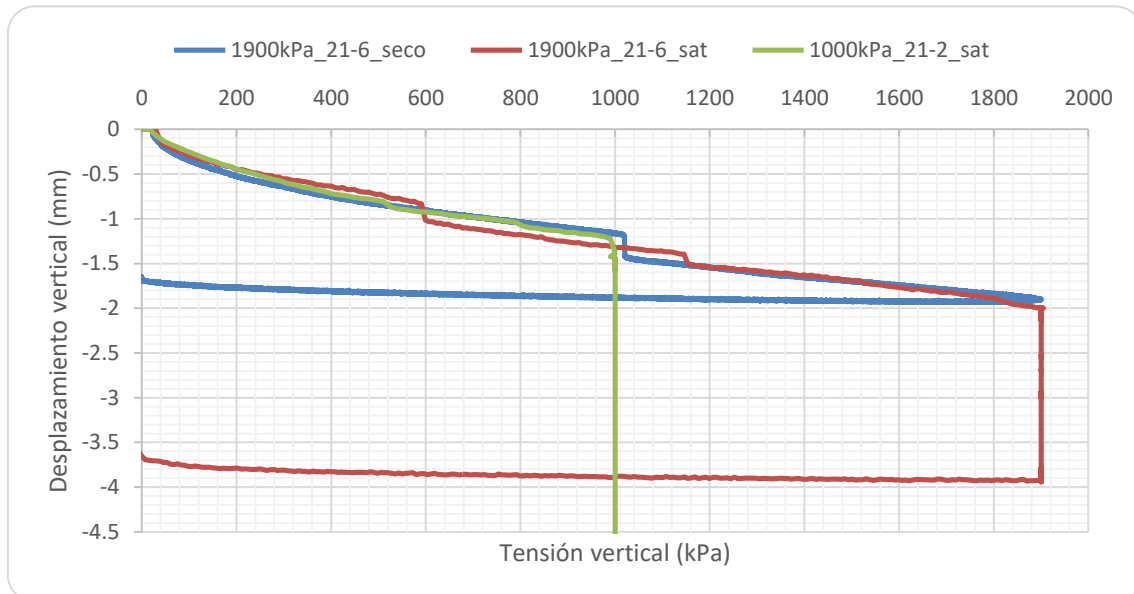


Figura 5.4-3 Comportamiento de los ensayos con relación al desplazamiento vertical vs la tensión vertical al inicio de aplicar la carga.

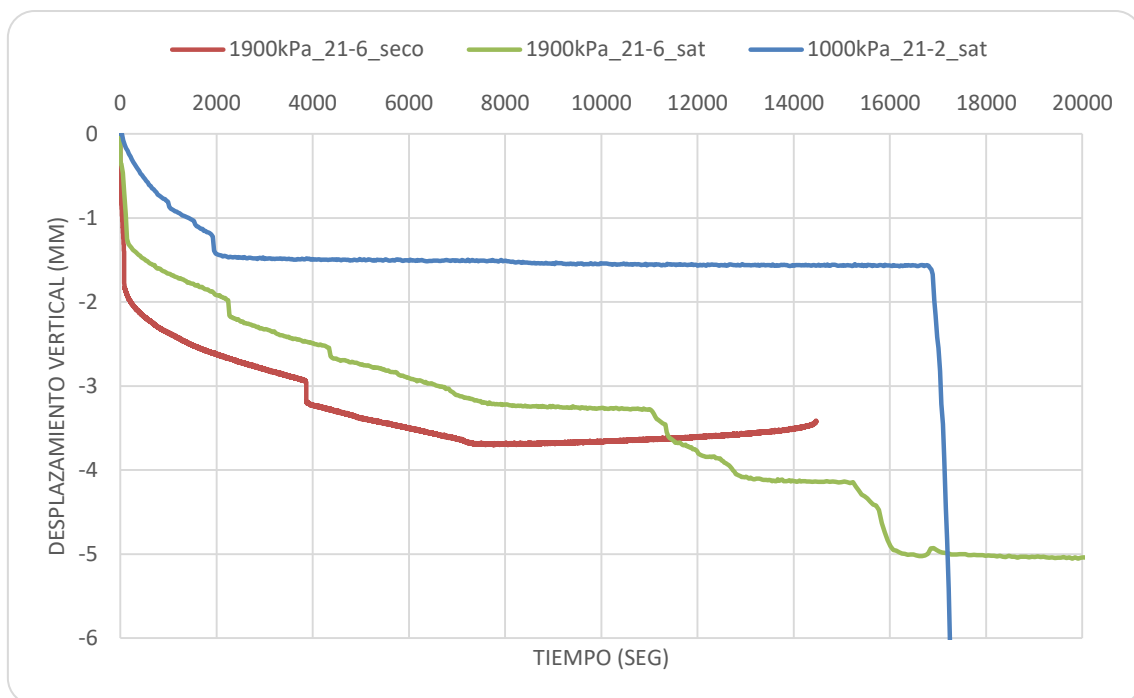


Figura 5.4-2 Desplazamiento vertical con relación al tiempo de los ensayos.

Analizando los ensayos en los que se ha realizado la saturación por separado se llega tomando como referencia la figura 5.4-3, se puede notar que al momento de saturar las probetas estas no sufren una deformación instantánea, ya que debido al diseño de las probetas se toma un tiempo para que el agua se introduzca en la estructura.

## Conclusiones.

En esta investigación se ha establecido un procedimiento de fabricación de agregados cementados con propiedades hidromecánicas prefijadas. Estos clastos artificiales permiten llevar a cabo de forma sistemática las labores de investigación en laboratorio acerca de la compactación de suelos que contengan agregados cementados naturales.

Es importante mantener las características de densidad y humedad de los clastos fabricados puesto que puede afectar a sus caracterizas mecánicas. Se ha comprobado que la humedad es un factor importante en el momento de fabricar los agregados ya que cambios de humedad alteran la resistencia de las muestras. Otro factor tener en cuenta es la cantidad de cemento y la cantidad de agua necesaria para su hidratación.

El cambio de resistencia de las probetas fabricadas en esta investigación conforme va avanzado el tiempo de curación de las mismas es poco significativo y es coherente con el observado en trabajos previos.

En relación al ensayo de tracción indirecta se pudo comprobar que los valores más bajos de la resistencia de tracción indirecta han sido obtenidos en las muestras con menor cantidad de cemento. Se ha constatado que la resistencia tracción es del orden del 20% de la resistencia a compresión. Se han realizado ensayos edométricos utilizando como material a ensayar un conjunto de cilindros de suelo cementado con diferentes dosificaciones.

En los ensayos se ha puesto de manifiesto la diferencia de comportamiento entre las muestras ensayadas en seco y las ensayadas después de la inundación de la muestra. Las muestras ensayadas en seco han presentado una rigidez importante con pocas roturas o roturas concentradas siguiendo los caminos de transmisión de las tensiones. En cambio, se ha comprobado que la inundación de la muestra conduce al desmoronamiento de los cilindros compactados y a una deformación importante por colapso.

La observación directa de las roturas en los ensayos edométricos en seco ha mostrado pautas de comportamiento son compatibles con la rotura por tracción indirecta.

## **7. Futuras líneas de investigación.**

Partiendo del hecho que esta investigación se fijó una metodología de fabricación de las probetas, es conveniente influir que para futuras investigaciones sean tomar en cuenta el método de fabricación de las muestras, para ver cómo se comportan con una nueva fabricación.

En base al contenido de agua, sería bueno hacer ensayos de permeabilidad para conocer cuál es el valor aproximado para cada tipo, debido a que la cristalización del cemento puede minorar la permeabilidad en un suelo con valores altos.

Por otra parte cabe destacar que sería interesante realizar más ensayos edométricos pero tomando en cuenta la manera en colocar las probeta, debido a que en esta investigación se analizó las muestras tomando en cuenta el contacto de entre las generatrices de las probetas.

Además de que se podrían realizar otros tipos de ensayos para ver su comportamiento, ensayos como el de columna resonante, edométricos con succión controlada, entre otros que puedan aportar a la investigación. Actualmente es importante realizar a la vez algún que otro, programa de modelación de métodos de elementos finitos.



## 8. Bibliografía

- Ciments Molins Industrial. (2016). *super-dragon*. Obtenido de [www.cmi.cemolins.es](http://www.cmi.cemolins.es): <http://www.cmi.cemolins.es/super-dragon>
- AENOR. (1993). *UNE 103400:1993. Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo*.
- AENOR. (1995). *UNE 103-101-95- Análisis granulométrico de suelos por tamizados*.
- ANCADE, ANTER y IECA. (2010). *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal*. Madrid.
- Cañavate Grimal, A. (2010). *Influencia de la forma de las partículas en la compresibilidad de las escolleras*. Barcelona .
- González Blanco, L. (2012). *La Microestructura en el Comportamiento Volumétrico de un Suelo Compractado*. Barcelona .
- Nonell Arellano, X. (2015). *Fabricación de clastos artificiales en laboratorio y el estudio de sus propiedades hidromecánicas*. Barcelona.
- Peralta Acosta, E. (2014). *Evolución de la curva granulométrica durante la compactación de un suelo mezclado con fragmentos de roca*. Barcelona.
- Romero Morales, E. (2013). A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties. *Engineering Geology*, 3-19.
- S. Mirsaleji. (2014). *PhD thesis proposal: Optimizing soil compaction with “all one” mixtures. An experimental and constitutive study*.